М. И. БЛУДОВ

# БЕСЕДЫ ПО ФИЗИКЕ

М. И. БЛУДОВ БЕСЕДЫ ПО ФИЗИКЕ



МИР ЗНАНИЙ

М. И. БЛУДОВ

# БЕСЕДЫ ПО ФИЗИКЕ

*Часть III*

ИЗДАНИЕ 2-е,
ПЕРЕРАБОТАННОЕ

МОСКВА «ПРОСВЕЩЕНИЕ» 1974

53
Б70

**Блудов М. И.**
**Б70** Беседы по физике. Ч. III. Изд. 2-е, переработ. М., «Просвещение», 1974.

256 с. с ил. 4 л. цв. ил. (Мир знаний.)

III часть книги «Беседы по физике» посвящена общим принципам и методам современной физики. Изложенные в доступной форме элементы теории относительности, статистической физики, теории вероятностей вводят читателя в мир высоких скоростей и мир малых объектов с присущими им законами релятивистской и квантовой механики.

Б $\frac{60601-635}{103\ (03)-74}$ ~~197—74~~ 53

## Оглавление



Михаил Иванович Блудов

БЕСЕДЫ ПО ФИЗИКЕ, ч. III

Редактор *В. А. Обменина.* Обложка художника *С. Ф. Лухина.* Художественный редактор *Т. А. Алябьева.* Технический редактор *М. Д. Козловская.* Корректоры *Н. М. Данковцева, Р. Б. Штутман.*

Сдано в набор 12/II 1974 г. Подписано к печати 23/VIII 1974 г. 60×90[1]/16. Бумага тип. № 1. Печ. л. 16+0,5 вкл. Уч.-изд. л. 17,21.+0,66 вкл. Тираж 100 тыс. экз. А11553.

Издательство «Просвещение» Государственного комитета Совета Министров РСФСР по делам издательств, полиграфии и книжной торговли. Москва, 3-й проезд Марьиной рощи, 41.

Отпечатано с матриц Саратовского ордена Трудового Красного Знамени полиграфкомбината на Калининском полиграфкомбинате детской литературы имени 50-летия СССР Росглавполиграфпрома Госкомиздата СМ РСФСР. Калинин, проспект 50-летия Октября, 46. Зак. 919.

Цена без переплета 56 к., переплет 14 к.

## ЕСЛИ ВАМ СЕМНАДЦАТЬ ЛЕТ
### (ВМЕСТО ВВЕДЕНИЯ)

Вам, кому сейчас 16—17 лет, посвящается эта книга. Приближается весна, а с ней переломный момент в вашей жизни — выпускные экзамены, получение аттестата зрелости, прощание со школой. Серьезная задача возникает теперь перед вами. Окончена школа, а с ней и детский период жизни. Что же дальше? Вуз, техникум, производство? Ответ зависит от многих причин — от условий вашей жизни, склонностей, влияния семьи и окружающих лиц. Вчера еще все было просто и ясно. Расписание уроков, школа, резервы свободного времени определяли ваши поступки на каждый день. И вдруг все это позади! Еще не забыты школьные привычки, не продуманы горячие споры с товарищами, голова полна впечатлениями последних дней. Ведь это только вчера на прощальном школьном балу Валя получила записку-полупризнание, которую она не покажет никому, но которую она готова перечитывать без конца. Ведь это только вчера Олег не мог найти нужных, ах как нужных, слов, прощаясь с Катей. Ведь Катя решила пойти работать и уезжает на новостройку. Помните, как в шутливой песенке М. Исаковского:

Уезжает девушка
На Дальний Восток.
Девушка хорошая,
Лучше не сыскать.
И не знает парень,
Что ей говорить,
И не знает парень,
Что ей подарить.
Всю бы душу отдал,
Только не берет,
Ласково смеется
Да глядит вперед.
Подарил бы Солнце —
Солнца не достать,
И решает парень
— Научусь летать.
На зарю дорогу
В тучах проложу,
Все, что недосказано,
После доскажу...

Мило, романтично? Да. Но согласитесь, выбор профессии сделан пареньком без достаточных оснований.

А вот другой мой знакомый мальчик, Володя, чуть не с пятого класса увлечен самолетами. Он построил множество моделей планеров и самолетов с резиновыми и даже бензиновыми моторчиками, ракет с кинолентами в качестве горючего. Он чувствует себя на седьмом небе, если ему удастся вместе со знакомым летчиком посидеть несколько минут в кабине стоящего на аэродроме самолета. Он перечитал всю доступную ему

литературу о воздухоплавании. Он ни о чем другом не мечтает, как о профессии летчика. Его судьба ясна.

Игорь, надо думать, станет инженером-путейцем. Его отец и дед — железнодорожники. Ежедневное общение с ними привило ему интерес и склонность к этой профессии.

Мы часто видим, как дети врачей поступают в медицинские институты или училища, дети педагогов становятся учителями или научными работниками.

Миша — будущий физик-теоретик*. Он уже сейчас с увлечением читает книги «Неизбежность странного мира» Д. Данина, «Что такое квантовая механика» В. Рыдника, изучает «Высшую математику для начинающих» академика Я. Зельдовича.

Оля будет астрономом. Может быть, ей удастся разрешить парадокс Ольберса: почему небо не сверкает ночью, как Солнце; если число звезд бесконечно и в каком бы направлении мы ни провели от нашего глаза прямую, мы обязательно должны встретить в бесконечной вселенной звезду. Любовь к астрономии у Оли тоже наследственная; в библиотеке дедушки она находила много интересных книг, таких, как «Множественность обитаемых миров» Фонтенеля, «Популярная астрономия» К. Фламмариона, «Очерки о Вселенной» Б. А. Воронцова-Вельяминова и др. А как интересно было смотреть в телескоп, который соорудил дед, на Луну, планеты, двойные звезды!

Иногда интерес к предмету появляется под влиянием бесед с товарищами. Петя с Гришей, например, всерьез заинтересовались бионикой и уже второй год не упускают случая узнать поближе, что изучают на биофизическом факультете медицинского института. Бионика совсем еще молодая наука. Ее эмблема — скальпель и паяльник, соединенные знаком интеграла, — символ объединения медицины и техники. Ее задачи — моделировать жизнь.

Аэронавтика, навигация, медицина, строительство, архитектура, радиоэлектроника — вот поле приложения методов бионики.

А физика моря?! Книги академика В. В. Шулейкина — «Очерки по физике моря», «Дни прожитые» — действительно могут зажечь энтузиазмом, увлечь мечтой, жаждой познать законы голубых пространств океана. Одна мысль о плавании на экспедиционном судне среди суровых просторов Арктики или под знойным небом тропиков уже кружит голову...

Геологоразведка, поиски самоцветов и полезных ископаемых, которыми так богата наша страна... да разве перечислишь хотя бы только названия еще многих интереснейших специальностей? Родине нужно много ученых, инженеров, техников, врачей, педагогов, работников всевозможных специальностей. По-

---

* Я называю имена мальчиков и девочек — персонажей, встречающихся в моих первых двух книгах «Беседы по физике», а также имена моих юных друзей, знакомых мне лично или завязавших со мной переписку. — *М. Б.*

желаем же нашим юношам и девушкам, вступающим в жизнь, успеха на избранном ими пути.

Чтобы плавали дальше,
Чтобы выше летали,
Чтоб своими руками
Звезды с неба снимали.

Всякая наука интересна, иначе она не была бы наукой, не привлекала бы к себе энтузиастов, которые, накопив определенную сумму полезных знаний, превратили их в систему, наполнили ее содержанием, разработали соответствующие ей методы.

Но какую бы специальность вы себе ни избрали, помните, что и технические, и биологические науки — это науки об объектах физического мира, и для овладения ими необходимо знание физических закономерностей. Не вызывает ни у кого сомнений, что физика является теоретической основой техники. Какую бы отрасль техники мы ни взяли, в ее основе лежат законы физики. Положение «физика сегодня — это техника завтра» оправдывается в полной мере, если присмотреться к успехам современного производства: автоматика, телеуправление, новые материалы, рекордные скорости, сверхмощные двигатели, — все это реализация на практике физических исследований, как бы теоретичны ни казались они вначале.

Науки о жизни и человеке — биология, медицина — не могут развиваться вне связи с физикой. Машина входит сейчас и в операционную хирурга, и в кабинет врача, и в лабораторию биолога. Аппараты искусственного кровообращения, искусственные легкие, почки, электрические приборы, регистрирующие работу сердца, работу мозга, широко используются в физиологических и психологических исследованиях.

Вам, вступающим в жизнь, посвящается эта книга об основных принципах и методах физики. Для наилучшего использования книги необходимо предварительно познакомиться с ее общей структурой. В основу ее положена определенная последовательность и логика, поэтому читать ее надо по порядку, главу за главой.

Первые три беседы касаются математического аппарата физики, причем главное место отводится понятию о функциях. Ведь собственно физика и изучает функциональную зависимость между величинами. Но недостаточно под термином «функция» понимать переменную величину, зависящую от другой переменной величины — аргумента. В этой книге дается современное определение функции, опирающееся на понятие о множествах и соответствии.

Читателя не должны отпугивать заголовки следующих бесед: «Немного высшей математики» и «Элементы векторной алгебры». О современной физике невозможно говорить, не пользуясь понятиями и символами высшей математики — дифференциального и интегрального исчисления, векторной алгебры.

Известное нарастание трудностей положено в основу серии «Бесед», в соответствии с ростом общего развития и познавательных возможностей учащихся старших классов.

Понятие относительности движения и пользование системой отсчета знакомо и классической физике, учащиеся должны правильно применять их при решении задач на движение, импульс, энергию. Полезные уточнения по этому поводу читатель найдет в главе с загадочным названием — «В потемках». Быть может, она позволит выбраться из потемок, в которых блуждают часто те, кто полагается на так называемый «здравый смысл».

Теория относительности Эйнштейна, частная и общая, порывая с обыденным понятием здравого смысла, ставит и разрешает такие вопросы: почему не может тело двигаться быстрее света; как разрешить «парадокс близнецов», из которых один, отправившись в космическое путешествие со скоростью, близкой к скорости света, по возвращении обнаруживает, что он стал моложе брата; возможны ли путешествия к далеким звездным мирам, свет от которых доходит до Земли через сотни и тысячи лет; что такое инерция и какова связь ее с законом тяготения?

Какие сюрпризы приносит движение со скоростью, большей скорости звука, а также что понимать под скоростью звука и скоростью света? Эти и многие другие необычные вопросы разбираются в большой группе бесед, касающихся теории относительности.

Методы статистики и теории вероятностей составляют следующую группу статей. Эти статьи вводят читателя в мир малых объектов — микромир, с присущими ему законами квантовой механики. Теория относительности и квантовая механика — это то новое, что в основном отличает современную физику от физики классической. Но ни теория относительности, ни квантовая физика не отменяют классической физики, — они только указывают границы ее применения. Об этом подробно говорится в заключительной главе — «Границы применения классической, релятивистской и квантовой физики».

«Нельзя знать науку, не зная ее истории» — такими словами начинает известный революционер, шлиссельбургский узник Н. А. Морозов свою книгу «В поисках философского камня». Набросать схему этапов развития физики на фоне общей истории человечества было всегда мечтой автора «Бесед по физике». Отдельные зарисовки исторических моментов в развитии физики и образы ее творцов встречаются на протяжении всех трех книг наших «Бесед». Показать же общую перспективу развития науки, ее связь и ее роль в общей истории цивилизации — это значит синтезировать отдельные идеи и течения в единое, стройное целое. Думается, полезность такого синтеза в третьей, заключительной части «Бесед по физике» бесспорна.

Автор ждет откликов со стороны читателей на его книги, в которые вложен весь опыт его жизни, вся увлеченность, все вдохновение.

## ПРЕЖДЕ ВСЕГО О ФУНКЦИЯХ

Если вы приобрели билет в театр, то вы, конечно, уверены, что в зрительном зале в соответствующем ряду имеется определенное место для вас, и когда вы приходите в зрительный зал, то видите, что подобно вам и обладатели других билетов направляются к соответствующим местам зала «согласно номерам купленных билетов». Ряд кресел и ряд соответствующих билетов — простая, естественная закономерность.

Взгляните на расписание железнодорожных поездов. По расписанию ваш поезд должен в определенное время прибыть на определенную станцию — снова перед вами два ряда соответствующих друг другу чисел. Здесь в виде таблицы запечатлено физическое соотношение между временем и расстоянием, проходимым поездом за это время. Расписание позволяет вам быстро ориентироваться в порядке следования вашего маршрута.

В магазине расчетная таблица оплаты того или иного количества отпускаемого покупателю товара позволяет продавцу быстро определить стоимость вашей покупки. Перед нами опять параллельные ряды соответствующих величин — цена, количество, стоимость.

Взятые примеры из разных случаев обыденной жизни должны показать вам, что математическое понятие функции не является достоянием только этой мудрой науки, но что мы встречаемся с ним и пользуемся им в нашей жизни всегда и на каждом шагу. Идея функциональной зависимости между величинами навеяна окружающей нас действительностью, ибо в каждом явлении природы, быта и техники мы встречаемся с величинами, находящимися во взаимной связи, и каждому значению одной величины ($x$) соответствует определенное значение другой ($y$), и изменения одной величины сопровождаются изменениями другой.

Заметьте, что, говоря так, мы из бесчисленного множества связей переменных величин между собой выделяем лишь некоторые, наиболее в данный момент существенные. Так, в железнодорожном расписании, предназначенном дать вам быструю справку о том, где в определенное время будет находить-

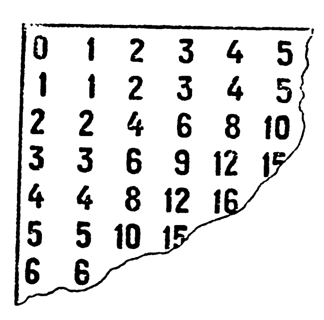


Рис. 1. Таблица умножения

ся ваш поезд, вы не найдете указаний на мощность локомотива, сцепной вес его, характер профиля пути на отдельных перегонах и другие причины, хотя и определяющие характер движения, но вас в данный момент не интересующие.

Другой пример: изучая движение тел, брошенных горизонтально или под углом к горизонту, мы интересуемся прежде всего зависимостью между дальностью полета и временем. Изучение же законов полета показало, что нужно принимать во внимание начальную скорость, угол наклона бросания, наконец, сопротивление воздушной среды, а для расчетов полета сверхдальних баллистических ракет учитывать и изменение плотности в различных слоях атмосферы. Чем глубже хотим мы изучить какое-нибудь явление, тем большее число факторов придется учитывать.

Что же такое представляет собой функция? Современное определение функции исходит из идеи множества и соответствия, подвести к которым читателя мы и пытались в предыдущих примерах. Однозначное (не допускающее неопределенности и сомнений) соответствие элементов двух множеств и составляет понятие функции. Вот математическое определение функции: если каждому элементу $x$ некоторого множества явлений $M_1$ соответствует в точности некоторый элемент $y$ множества явлений $M_2$, то такое соответствие называется функцией.

Общая форма записи функциональной зависимости: $y = f(x)$.

Не следует смешивать математическое понятие «множество» с житейским «много». Возможно множество и из одного элемента.

Множество $M_1$ называется областью определения функции, а множество $M_2$ — областью значений функции. Понятно, что область определения функции ограничена допустимыми значениями функции. Так, для функции $y = \arcsin x$ недопустимыми будут значения синуса, большие единицы. Область допустимых скоростей ограничена скоростью света в вакууме, температура твердого тела возможна в пределах от —273, 15° С до точки плавления данного вещества и т. д.

Элементы из области определения выбираются нами произвольно, независимо, но раз выбранные, они тем самым определяют и соответствующее значение функции. Значение функции, таким образом, зависит от выбора независимого элемента. Образно можно сравнить область определения и область значений функций с двумя ящиками с разными предметами: когда мы вынимаем из «ящика определений» некоторый предмет, за ним, словно скрепленный с ним невидимой нитью, вытаскивается определенный предмет из «ящика значений функций». Поэтому

элементы области определения называют независимыми переменными или аргументами, а элементы области значений функции — зависимыми переменными или функциями.

Сам термин «функция» впервые был введен Лейбницем в 1684 г., он же дал и определение функции.

Понятие функциональной зависимости имеет исключительно большое значение для изучения физики. Никакое другое понятие не отражает с такой конкретностью явлений реальной действительности в их подвижности, в их вечной изменчивости, в их взаимной связи и обусловленности, как понятие функциональной зависимости. О значении усвоения понятия функциональной зависимости в средней школе проф. А. Я. Хинчин говорит: «Понятие функциональной зависимости есть основное понятие всей высшей математики, и качество подготовки оканчивающих среднюю школу в значительной степени измеряется тем, насколько твердо, полно и культурно они свыклись с этим важнейшим понятием»*. Вот почему третью, обобщающую часть наших «Бесед по физике» мы начинаем беседой о функции.

Каким образом должна быть выражена функциональная зависимость, чтобы ее можно было изучать или практически использовать? Имеется три способа выражения функциональной зависимости: табличный, аналитический (при помощи формул и уравнений) и графический.

**1. Таблицы.** Представление функциональной зависимости в виде таблиц позволяет очень быстро найти значение функции, соответствующее данному аргументу, как это мы видели в приведенных выше примерах. Некоторые таблицы позволяют найти значение функции, зависящей от двух независимых переменных. Так, первая таблица, с которой начинается школьная премудрость, — таблица умножения позволяет легко найти произведение двух чисел (рис. 1).

Таблицами функции одного переменного вы постоянно пользовались на уроках физики. Вспомните, как при решении задач вы обращались к справочнику, чтобы найти значение плотности, удельной теплоемкости, удельного сопротивления и др. Правда, зависимость этих величин от свойств вещества оставалась для вас (а часто и для ученых) скрытой, и вы принимали таблицу как результат опытных, лабораторных измерений, но все же это были таблицы функций.

Для быстрого расчета удобно пользоваться таблицами в тех случаях, когда зависимость между величинами установлена математически точно. Простейшей такой зависимостью назовем прямую и обратную пропорциональность, когда с увеличением одной величины (аргумента) в несколько раз увеличивается или уменьшается во столько же раз зависящая от нее функция.

---

* А. Я. Хинчин. Основные понятия и математические определения в средней школе. М., Учпедгиз, 1940.

Приведем примеры таблиц прямо и обратно пропорциональных величин.

Путь, пройденный при равномерном движении со скоростью 10 м/сек, в зависимости от времени

| Время, *сек* | Путь, *м* |
|---|---|
| 0 | 0 |
| 1 | 10 |
| 2 | 20 |
| 3 | 30 |

Давление газа, сжимаемого изотермически, в зависимости от объема ($V_1 = 4 м^3$, $p_1 = 1 н/м^2$)

| Объем, $м^3$ | Давление, $н/м^2$ |
|---|---|
| 4 | 1 |
| 2 | 2 |
| 4/3 | 3 |
| 1 | 4 |

Конечно, такие таблицы имеют ограниченное применение: по ним, не производя вычислений, можно найти значение функции только в пределах приведенных в таблице значений аргумента.

Вспомните пример более сложных зависимостей, когда вам приходилось пользоваться таблицами тригонометрических функций $\sin\alpha$, $\cos\alpha$, $\operatorname{tg}\alpha$ при решении задач по механике, оптике, электричеству. Без таблиц вопрос о нахождении значений этих функций превратился бы в трудную и непосильную для вас задачу.

А таблицы логарифмов? Изобретение логарифмов (1613 г.), сократив вычисления, вдвое увеличило продолжительность жизни астрономов — так говорил математик Лаплас.

Напишите два ряда чисел: один, представляющий степени числа 2, а над ним другой — соответствующие показатели степеней.

| Показатель | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 | 9 | 10 | 11 | 12 | 13 |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| Степень | 2 | 4 | 8 | 16 | 32 | 64 | 128 | 256 | 512 | 1024 | 2048 | 4096 | 8192 |

Верхний ряд — это логарифмы, а нижний — соответствующие им числа. Пусть вам надо помножить число 32 на 128. Вместо этого вы, пользуясь правилом умножения степеней с одинаковыми основаниями, складываете показатели степеней:

$$a^n \cdot a^m = a^{n+m},$$

$$n + m = 5 + 7 = 12,$$

и под логарифмом 12 находите в ряду чисел нужный вам ответ $32 \times 128 = 4096$.

При делении надо из логарифма делимого вычесть логарифм делителя. Возведение в степень сведется к умножению логарифмов, извлечение корня — к делению. Ловко? Жаль только, что составленная вами таблица позволяет производить действия только с числами, помещенными в ней. Эта таблица составлена

при основании 2, в школе вы пользовались таблицами, составленными при основании 10, являющемся основой нашего счета, и потому, пользуясь такими таблицами, можно находить логарифм любого положительного числа. Значения логарифмов в этих таблицах даны приближенные с точностью до четвертого десятичного знака. Вполне пригодна для школьной практики и трехзначная таблица логарифмов. (См. приложение.)

Точность трехзначной таблицы логарифмов вполне достаточна и для многих технических расчетов. Инженеры и техники постоянно пользуются логарифмическими линейками, обеспечивающими такую же точность. Легко показать, что принцип устройства логарифмической линейки основан на том же правиле действий над степенями с одинаковыми основаниями, только само действие механизировано и упрощено до предела. Вместо того чтобы в уме (или на бумаге) складывать логарифмы при умножении, вы механически приставляете друг к другу отрезки $a$ и $b$, длины которых соответствуют логарифмам нанесенных на шкалы линейки чисел, и читаете на шкале чисел ответ (рис. 2):

| Логарифмы | $a$ | $b$ | $a+b$ |
|---|---|---|---|
| Числа | 1,3 | 1,35 | 1,76 |

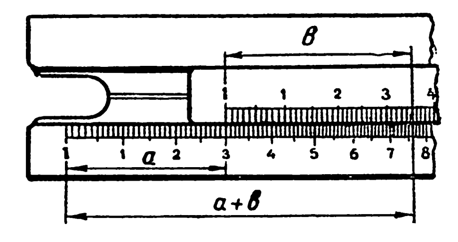



Рис. 2. Умножение на счетной ▶ линейке.

Писать, таким образом, не приходится.

В школе вы, наверно, приобрели навыки в обращении с логарифмической линейкой, а потому предлагаем проделать такой расчет*:

$$s = \frac{V\rho q\eta}{Pk} \ (м),$$

где $V = 55$ л;

$\rho = 0{,}7 \ \frac{кг}{л}$;

$q = 4{,}6 \cdot 10^7 \ \frac{дж}{кг}$

$\eta = 0{,}17$;

$P = 15000$ н;
$k = 0{,}04$.

Таблицы позволяют непосредственно находить значения только тех функций, аргументы которых помещены в таблице. А если надо найти какое-нибудь промежуточное значение? Тогда прибегают к интерполяции (что в переводе и означает «нахождение промежуточного значения»). Разумеется, при этом надо знать закон, по которому происходит изменение функции. В таблицах логарифмов мы применяем при интерполяции закон прямой пропорциональности, хотя это и не вполне точно.

* Емкость бензобака автомобиля 55 л. На сколько километров пути хватит горючего при равномерном движении, если вес автомобиля 15000 н, а к.п.д. 17%? Коэффициент сопротивления 0,04. (Ответ. $s \approx 500$ км.)

**2. Уравнения.** Более точно, чем в таблицах, соотношение между зависимыми и независимыми переменными выражается формулами и уравнениями. В самом общем виде функциональная зависимость между двумя величинами записывается так: $y = f(x)$ или $f(y, x) = 0$.

Приведем примеры элементарных алгебраических функций, с которыми вам приходилось встречаться в физике. Из алгебры известно, что простейшая функциональная зависимость выражается уравнением первой степени $y = kx + b$ и носит название линейной зависимости. При $b = 0$ мы имеем выражение прямой пропорциональной зависимости $y = kx$.

Многие задачи по физике связаны с равномерным движением. Зависимость между скоростью равномерного движения $v$, временем движения $t$ и пройденным путем $s$ выражается формулой: $s = vt$.

Для равноускоренного движения формула скорости представляет собой формулу линейной функции: $v = v_0 + at$.

Вы можете привести множество других примеров линейной связи между физическими величинами: связь массы, плотности и объема, зависимость длины стержня от температуры, закон Ома ($I = \sigma U$, здесь $\sigma = \frac{1}{R}$).

Зависимость пути, пройденного в равноускоренном движении, от времени выражается частным видом уравнения второй степени:

$$s = v_0 t + \frac{at^2}{2}.$$

К функциям степени с отрицательным показателем вида $y = x^{-1}$, или $y = \frac{1}{x}$, относятся все случаи обратно пропорциональной связи между величинами: закон Бойля — Мариотта $pV = C$, зависимость между током и сопротивлением (при постоянном напряжении) $U = IR$ и др.

Надо иметь в виду, что формула охватывает все множество значений функции (в пределах области ее определения) и потому имеет более общий характер, чем таблица, содержащая только некоторые значения этого множества. Кроме того, большим преимуществом формулы является то, что она позволяет выразить значение функции с любой степенью точности (в зависимости, конечно, от точности выбранного значения аргумента).

Например, определяя диаметр проволоки, площадь поперечного сечения которой равна 4,00 *мм*$^2$, из формулы $S = \frac{\pi d^2}{4}$, получим

$$d = \sqrt{\frac{4S}{\pi}} = 2{,}26 \text{ мм}.$$

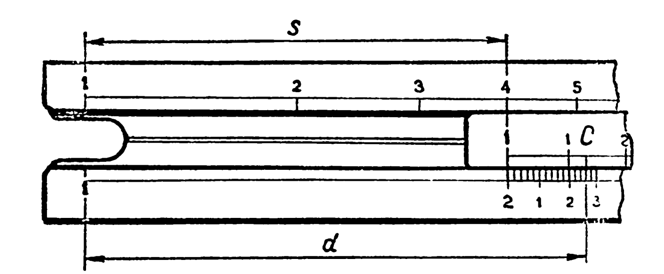



Рис. 3. Значок «С» на линейке.

Считаем не лишним указать, что такой же точности ответ можно было получить при помощи логарифмической линейки, используя вспомогательный значок «С» на шкале чисел (рис. 3). Правило: поставить начало подвижной линейки против числа, равного площади круга на шкале квадратов, тогда значок «С» подвижной линейки покажет на шкале чисел искомый диаметр круга. Ясно, что так же легко по данному диаметру, взятому на шкале чисел, придвинув к нему значок «С», найти на шкале квадратов площадь круга. Спросите у вашего учителя математики, что это за таинственный значок «С», который позволяет так ловко решать важную и часто встречающуюся задачу — нахождение диаметра по данной площади круга и обратно. Будете ли вы вычислять силу давления газа в цилиндре на поршень, производить расчет проводов на определенную силу тока, вам потребуется вычислять площадь круга. Пользуйтесь же значком «С» на логарифмической линейке.

Широко применяются в физике тригонометрические функции. Вспомните примеры, где вы с ними встречались: тангенс угла естественного откоса позволял вам, не прибегая к динамометру, определять коэффициент трения:

$$k = \frac{F}{N} = \operatorname{tg} \alpha.$$

Сила, движущая маятник, зависит от синуса угла отклонения:

$$F = P \sin \varphi.$$

Фазой колебательного движения называется угол, находящийся под знаком синуса в формуле смещения $s = s_m \sin \varphi = s_m \sin \omega t$, где $\omega$ — угловая скорость в векторной диаграмме такого движения. Понятие же фазы — основное в учении о периодических явлениях, оно показывает степень развития колебательного процесса и находит самое широкое применение в механике, акустике, оптике и особенно электро- и радиотехнике.

Сравнительно редко приходится встречать в элементарном курсе физики показательную функцию. Приведем здесь только формулу закона радиоактивного распада:

$$m = m_0 e^{-\lambda},$$

где $m_0$ — количество исходного вещества, $m$ — количество вещества, оставшегося нераспавшимся по прошествии времени $t$. Величина $\lambda$ есть постоянная величина, характеризующая вероятность распада одного ядра (мы подробнее будем говорить об этом в беседе «Продолжительность жизни атомов»). Число $e$ есть основание натуральных логарифмов, равное 2,7182... Это одно из замечательных чисел в математике. Подобно числу $\pi$, оно относится к трансцендентным числам (числам, не выражаемым корнем уравнения). В то время как число $\pi$ появляется в формулах каждый раз, когда речь идет о круглых телах и фигурах, число $e$ выходит на сцену, когда идет речь о росте или уменьшении какой-нибудь величины: прирост народонаселения, банковские расчеты процентов, расход горючего в ракетном двигателе, распад радиоактивного вещества и т. д. Это число принято за основание так называемых натуральных логарифмов ln. Натуральные логарифмы имеют очень большое применение в физике. Однако в области элементарной физики можно ограничиться десятичными логарифмами, помня, что между натуральным и десятичным логарифмом существует соотношение $\ln M = 2{,}3 \lg M$.

В заключение обзора алгебраических функций приведем два примера, которые покажут пользу применения логарифмического масштаба.

Единицы громкости звука — бел и децибел. Обычно учащиеся с трудом усваивают эти единицы. Сделаем необходимое разъяснение, заимствовав его из популярной книги Л. Д. Ландау и А. И. Китайгородского «Физика для всех»*: «Органы чувств человека во многих отношениях совершеннее самых лучших приборов. Это справедливо и для уха. Мы способны воспринимать в виде звука волны с интенсивностью от $10^{-9} \frac{эрг}{см^2 \cdot сек}$ до $10^4$ этих единиц. Таким образом, сильнейший звук отличается от слабейшего в десять триллионов раз... Поэтому оценивать громкость звука величиной энергии практически неудобно.

Представьте себе, что сотруднику, изыскивающему средства для борьбы с уличным шумом, надо сделать доклад на сессии городского Совета и рассказать, насколько уменьшится шум, если заменить трамвайное движение троллейбусами и автобусами и запретить автоводителям подачу сигналов на улицах и т. д. Чтобы картина была наглядной, надо прибегнуть к плакатам. Как это принято при построении различного рода диаграмм, можно нарисовать на плакате столбики, высоты которых будут изображать степень шума. Но если определять

---

* Л. Д. Ландау, А. И. Китайгородский. Физика для всех. М., Физматгиз, 1963, стр. 335.

громкость звука величиной энергии, то возникает непреодолимая трудность: тишина и шум отличаются друг от друга столь значительно, что изобразить их на одной диаграмме в одном масштабе гораздо труднее, чем нарисовать на одном плакате слона и муху в натуральную величину.

В подобных случаях в физике прибегают к так называемому логарифмическому масштабу».

Вы знаете из курса алгебры, что если взять ряд чисел, образующих геометрическую прогрессию (очень быстро растущий ряд), то логарифмы этих чисел образуют прогрессию арифметическую. Например, при основании 10 получим:

| Числа | 10 | 100 | 1000 | 10 000 | 100 000 | 1 000 000 | . . . |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| Логарифмы | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | . . . |

Значит, пользуясь не энергией звуковых волн, а логарифмом этой величины, всегда можно уместить на одном плакате и шум авиационного мотора, и писк комара.

Нижний предел громкости $\left(10^{-9}\,\frac{\textit{эрг}}{\textit{см}^2\cdot\textit{сек}}\right)$ принимается за начальный уровень $E_0$. Энергию интересующего нас звука назовем $E$. Десятичный логарифм отношения этих величин $\left(\lg\frac{E}{E_0}\right)$ и принят за меру громкости. Единица громкости — бел. Десятая доля его — децибел. Вот таблица, поясняющая величину этой единицы:

| | |
|---|---|
| Шелест листьев . . . . . . . | 10 децибел |
| Тихая улица . . . . . . . . . | 30 » |
| Проезжающий автомобиль . . | 50 » |
| Громкий разговор . . . . . | 70 » |
| Шумная улица . . . . . . . | 90 » |
| Самолет . . . . . . . . . . . | 100 » |

В качестве другого примера применения логарифмического масштаба в физике возьмем диаграмму шкалы электромагнитных волн. Длины волн наиболее коротких $\gamma$-лучей измеряются тысячными долями ангстрема (ангстрем, $1\mathring{A} = 0{,}0001$ *мкм*), в то время как длина волн, даваемых генератором переменного пятидесятипериодного тока, питающего наши электрические лампы, равна 6000 *км*. Диапазон, как видите, столь огромный, что если бы область волн видимого спектра (0,4 *мкм*—0,76 *мкм*) изобразить на диаграмме длиной в 1 *см*, то при натуральном масштабе весь спектр электромагнитных волн растянулся бы на миллионы километров. Логарифмический масштаб позволяет изобразить этот спектр в легко обозримой диаграмме (рис. 4).

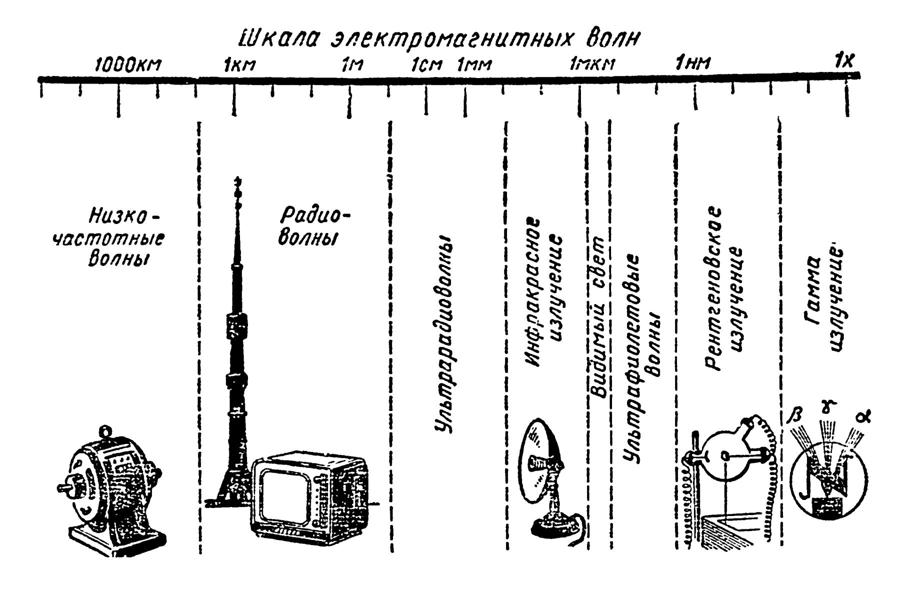



Рис. 4. Шкала электромагнитных волн в логарифмическом масштабе.

Относительно пользования формулами, изображающими функциональную зависимость, необходимо сделать еще несколько замечаний.

Прежде всего надо понять, что с величинами, обозначенными буквами, можно производить такие же математические операции, как с буквами в алгебраических выражениях. Подобно тому как из алгебраического равенства $a = \frac{bc^2}{\sqrt{d}}$ можно путем преобразования получить выражение для любой входящей в формулу величины, так из формулы, скажем, закона Ома $I = \frac{U}{R}$ можно найти любую величину: $U = IR$ и $R = \frac{U}{I}$, и тем самым в явной форме установить функциональную зависимость интересующей нас величины от других, входящих в формулу.

Много споров, однако, бывает из-за смешения понятия функции как соответствия элементов одного множества переменных величин элементам другого множества с определением функции как единственного значения зависимой переменной от ее аргумента. Поясним это на примере закона Ома, представленного в виде формулы $R = \frac{U}{I}$. Некоторые утверждают, что эта формула не представляет функциональную зависимость сопротивления от напряжения. Ведь стоит изменить во сколько-нибудь раз напряжение, как автоматически во столько же раз изменится

сила тока, или, другими словами, изменение числителя в силу физических причин вызывает здесь такое же изменение знаменателя и, следовательно, величина дроби (т. е. сопротивление) останется прежней. Приведенной формулой, верной математически, физик, говорят они, может пользоваться только для вычисления $R$ по данным $U$ и $I$. Такое рассуждение суживает понятие функции. Оно отрицает основную идею изменения (движения), лежащую в основе понятия функции.

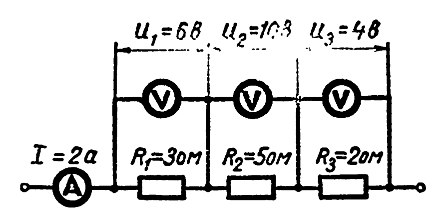



Рис. 5. Напряжения на последовательных участках цепи прямо пропорциональны сопротивлениям участков.

Разумеется, сопротивление данного проводника, например сопротивление спирали электрической плитки или волоска электрической лампочки, является при постоянной температуре собственным свойством электрического прибора и не зависит от напряжения, под которое подключается прибор. Сопротивление данного проводника зависит только от материала, площади сечения, длины, что и выражается известной расчетной формулой:

$$R = \rho \frac{l}{S}.$$

Однако если применять определение функции на основе понятия множества и соответствия, то и формула $R = \frac{U}{I}$ вполне подходит под это определение. Действительно, если мы расширим множество значений $R$, т. е. будем брать не один проводник, а несколько, то при постоянном $I$ величины $R$ и $U$ будут прямо пропорциональны друг другу. Например, в цепи последовательно соединенных проводников напряжения на отдельных участках цепи прямо пропорциональны сопротивлениям этих участков (рис. 5).

Приведем другой пример. Известно, что зарядка аккумуляторов производится током, величина которого определяется в зависимости от емкости аккумулятора. Допустим, нам надо зарядить аккумулятор током силой в 5 *а*, но напряжение генератора (источника) превышает напряжение, требуемое для получения такого тока, на 50 *в*. Как мы должны поступить, чтобы не нанести вред аккумулятору? Разумеется, применить последовательно включенный реостат, который должен принять на себя

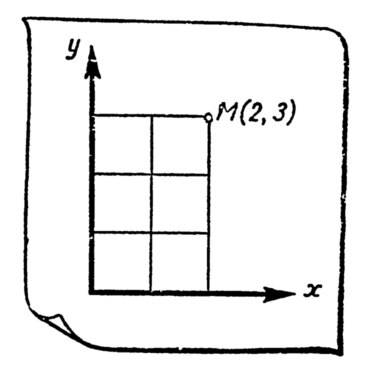



Рис. 6. Определение положения точки в прямоугольных координатах.

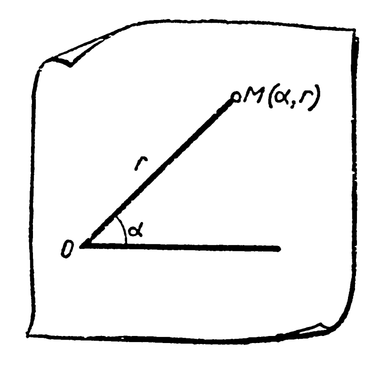
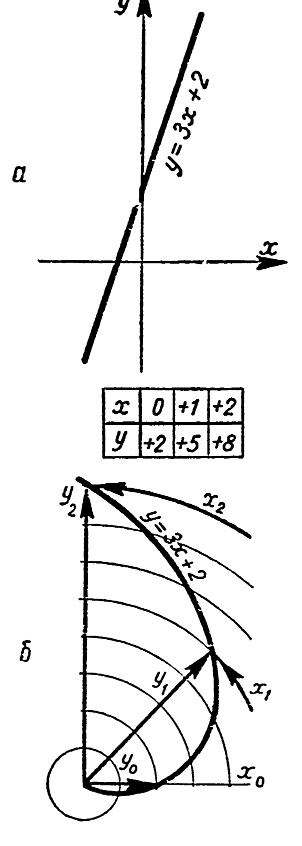



Рис. 7. Определение положения точки в полярных координатах.




| x | 0 | +1 | +2 |
|---|---|---|---|
| y | +2 | +5 | +8 |

Рис. 8. График линейной функции $y = 3x + 2$:

*а* — в прямоугольной системе координат; *б* — в полярной системе координат.

избыточное напряжение. Каково же сопротивление этого реостата? $R_1 = \frac{50\ в}{5\ а} = 10\ ом$. А если избыток напряжения не 50, а 100 *в*? Тогда $R_2 = \frac{100\ в}{5\ а} = 20\ ом$.

Мы видим, что сопротивление подбирается прямо пропорционально напряжению.

В связи с этим предлагаем решить такую задачу: «Плитка мощностью 600 *вт* предназначена для включения под напряжение 110 *в*. Можно ли включить эту плитку в сеть с напряжением 220 *в*, применив в качестве реостата последовательно включенную лампочку мощностью в 60 *вт*?

Каково должно быть сопротивление лампочки, чтобы плитка работала в нормальных, соответствующих ее паспорту условиях?»

**3. Графики.** Формула «сильнее» таблицы, так как позволяет определять значение зависимого переменного для любого допустимого значения аргумента (допустимого сообразно с физическим смыслом функции). Но формула уступает таблице в смысле наглядности, обозримости множества значений функции и аргумента.

Еще большей наглядностью обладает графический метод изображения функциональной зависимости. Графики позволяют сразу обозреть изменение функции, дают наглядную картину ее течения.

Графики строят в какой-нибудь системе координат. Наиболее часто применяется система прямоугольных и система полярных координат. В первом случае по оси *x* (ось абсцисс) откладываются значения независимых переменных, а по оси *y* (ось ординат) соответствующие значения зависимых переменных. Проведя

из соответствующей пары значений этих переменных линии, параллельные осям координат, получаем на плоскости точку, соответствующую данной паре чисел (рис. 6). Беря другие значения $x$ и $y$, строим новые точки, а соединяя точки плавной линией, получаем график исследуемой функции.

В полярной системе координат угол $\alpha$ соответствует углу, под которым к горизонтальной оси проводится радиус-вектор определенной длины $r$ (рис. 7).

Вид графика данной функции зависит от того, в какой системе координат мы его строим. Например, рисунок 8, *а*, *б* показывает график одной и той же линейной функции $y = 3x + 2$ в прямоугольной системе (*а*) и в полярной системе координат* (*б*).

Графики, составленные по результатам наблюдений, позволяют установить закономерность между наблюдаемыми изменениями величин. Вы, конечно, строили графики при проведении лабораторных работ. При этом вас, вероятно, огорчало, что точки, построенные по данным, полученным вами в ходе работы, только приблизительно ложатся на график (прямую линию, параболу, гиперболу, рис,. 9). Не огорчайтесь: причиной несовпадения являются неизбежные погрешности при измерениях.

Велико значение графиков не только как средства нагляд-

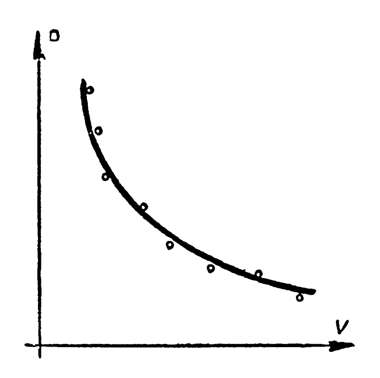



Рис. 9. Построение графика по точкам по данным эксперимента.

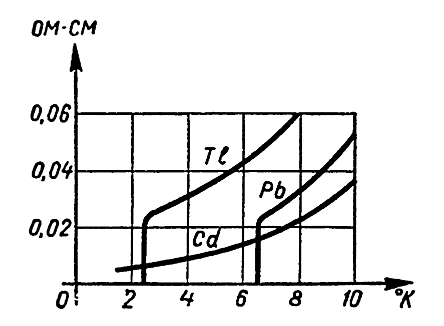



Рис. 10. При температурах, близких к абсолютному нулю, некоторые металлы полностью теряют свое электрическое сопротивление.

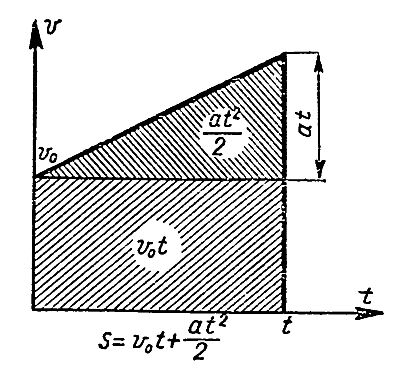



Рис. 11. Графический вывод формулы пути равноускоренного движения.

---

* График функции $y = 3x + 2$ в полярных координатах строится также по точкам по той же таблице. Только теперь значения $x$ дают нам величины угла поворота радиус-вектора в радианах (0, 1, 2, ...), а величины самого радиус-вектора — $y_0$, $y_1$, $y_2$, ... .

ного представления хода изменения функции, но и как средства, позволяющего в некоторых случаях быстро найти решение того или иного вопроса. Вы пользовались в школе графическим методом решения задач по механике при определении времени и места встречи двух тел (поездов, самолетов, ракет).

Графики не только позволяют наглядно представить ход изменения функции, но и позволяют вывести ряд заключений. Остановимся на некоторых из них.

Прежде всего, пользуясь графиком, мы можем с большой долей вероятности определить промежуточное значение функции, которое не входило в число наблюдений. Этот прием нахождения промежуточного значения называется интерполяцией. Мы говорили об этом при описании таблиц. Продолжение графика за пределы наблюдаемых значений называется экстраполяцией. Эта операция требует большой осторожности, так как при этом возможны неожиданные сюрпризы. В качестве примера приведем график зависимости удельного сопротивления проводника от температуры. Как видно из рисунка 10, экстраполяция для металлов таллия и свинца при некоторых температурах была бы ошибочна, так как они задолго до абсолютного нуля переходят в состояние сверхпроводимости и сопротивление скачком падает до нуля.

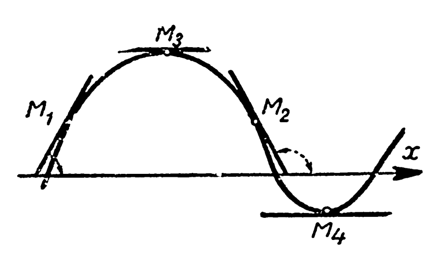


Рис. 12. Положение касательной позволяет определить течение функции.

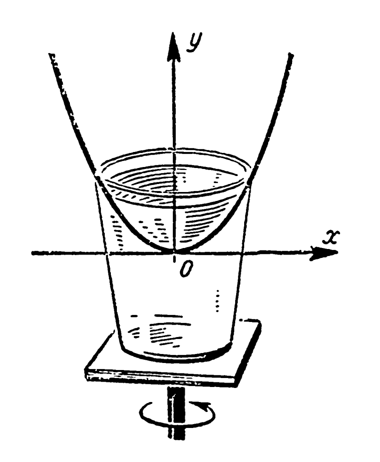


Рис. 13. Парабола.

Графики позволяют иногда находить значения величин, которые явным образом не обозначены на координатной сетке. Например, на графике скорости можно найти путь по площади, ограниченной графиком в пределах заданного отрезка времени. Вы помните, конечно, какой хорошо запоминающийся вывод формулы пути, пройденного в равноускоренном движении, дает графический метод (рис. 11).

Наоборот, по графику пути равноускоренного движения можно сделать заключение о скорости в данный момент. О том, к каким колоссального значения выводам приводит вопрос об определении скорости изменения функции, вы узнаете из следующей беседы — «Немного высшей математики».

## НЕМНОГО ВЫСШЕЙ МАТЕМАТИКИ

Началось все с касательной! Задача проведения касательной к кривой линии издавна привлекала к себе внимание математиков. Эта задача теснейшим образом связана с изучением функциональной зависимости. Посмотрите на график (рис. 12)— и вам сразу же бросится в глаза, что положение касательной дает возможность определить течение функции. Мы можем установить, что если касательная в точке $M_1$ образует острый угол с положительным направлением оси $x$, то функция возрастает, тупой угол с этим направлением оси (точка $M_2$) свидетельствует об убывании функции. В точках $M_3$ и $M_4$, когда касательная параллельна оси $x$, мы находим так называемые экстремальные (крайние) значения функции: в точке $M_3$—максимум, в точке $M_4$ — минимум.

Но прежде всего, что же называется касательной? Иногда говорят: касательной называется прямая, имеющая с кривой линией только одну общую точку. Но не назовете же вы ось $y$ касательной к параболе, имеющей вершину в начале координат (рис. 13). То же самое относится и к синусоиде (рис. 14). Не поможет и добавление к этому определению касательной условия, что все точки кривой вблизи точки касания должны при этом быть расположены по одну сторону прямой. Действительно, если провести касательную в точке перегиба,

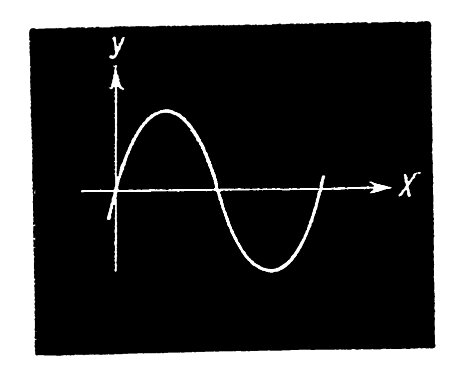



Рис. 14. Синусоида.

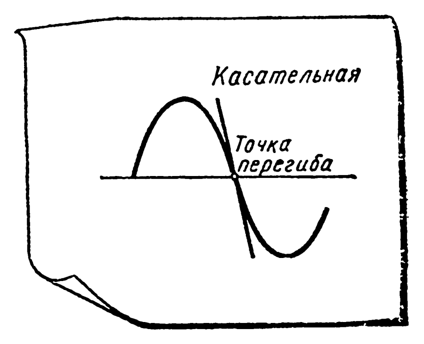



Рис. 15. Точка перегиба.

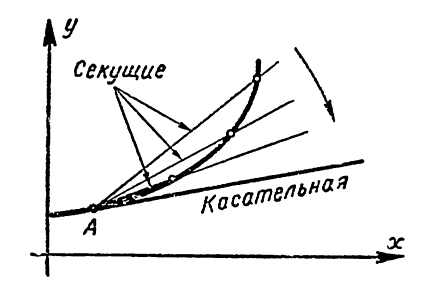



Рис. 16. Касательная — предельное положение секущей.

где кривая из вогнутой переходит в выпуклую, или наоборот (рис. 15), то точки кривой оказываются не по одну сторону касательной. Касательная в этом случае пересекает кривую.

Единственно правильным будет рассматривать касательную как предельное положение, в которое приходит секущая при вращении ее вокруг точки $A$ до сближения точек пересечения в одну общую точку с точкой $A$ (рис. 16). Так в геометрическую задачу о касательной вошла идея движения (движения как изменения, рассматриваемого в общем виде).

Нелегкой оказалась и задача проведения касательной к кривой линии. Для окружности все очень просто: прямая, проведенная перпендикулярно к радиусу в конце его, есть касательная. Это строго доказывается в геометрии, и потому, пользуясь циркулем и линейкой, можно легко провести касательную к окружности в данной точке.

Ну, а как быть с кривой линией? Не думайте, что можно довериться глазу и, поворачивая линейку подобно тому, как мы мысленно поворачивали секущую, найти, наконец, правильное положение касательной. Нельзя доверяться глазу, ведь незаметная на глаз ошибка может в практических вопросах, скажем при вычерчивании космических маршрутов, дать совершенно недопустимое отклонение.

Хорошо бы найти аналитический, а не геометрический образ касательной и аналитический же способ ее построения. Можно назвать ряд блестящих имен знаменитых математиков и физиков XVI—XVIII веков, много потрудившихся над подысканием решения этой задачи: Декарт, Паскаль, Ферма, Барроу и др.

Но особенно выделяются в этой плеяде имена двух великих современников — Ньютона (1642—1727) и Лейбница (1646—1716), гению которых человечество обязано созданием могущественного средства исследования процессов природы, известного под названием анализа бесконечно малых.

Под термином «высшая математика» обычно понимают именно этот ее раздел, в свою очередь распадающийся на две части: дифференциальное и интегральное исчисление.

Разумеется, в нашей беседе мы не сможем изложить даже важнейшие положения анализа, а тем более научить вас пользоваться ими. Цель данной беседы — рассказать об идее, приведшей к открытию анализа бесконечно малых, показать почти безграничные возможности этого метода познания, пробудить у читателя желание более детально познакомиться с ним по учебным руководствам. В предыдущих беседах (I и II части книги) нам часто не хватало этого основного математического аппарата современной физики, и мы лишь контрабандой вводили в наше изложение то идею движения, то символы $\frac{dy}{dx}$ или $\int y dx$, которые являются азбукой дифференциального и интегрального исчисления. Теперь настала пора поговорить с читателем об элементах высшей математики.

Ньютон, а затем Лейбниц, независимо друг от друга, пришли к открытию дифференциального и интегрального исчисления с тем только различием, что идеи Лейбница в исследовании касательных носят больше геометрический и философский характер, тогда как у Ньютона в его исследовании больше проступают идеи движения, идеи процесса, протекающего во времени, следовательно, идеи механики, идеи физики.

История сделала выбор из двух предложенных методов, предпочтя обозначения дифференциалов и интегралов, а также порядок расчетов, которые дал Лейбниц, но придав им в практическом применении направленность мыслей Ньютона. Это сделало анализ бесконечно малых всеобъемлющим методом исследования функциональной зависимости, с которой приходится встречаться в физике, технике и в других областях знания.

Как уже говорилось выше, оба великих ученых шли в своих исследованиях, отправляясь от задачи о касательных. Лейбниц опубликовал свое сочинение под таким длинным названием: «Новый метод нахождения максимумов и минимумов, а также касательных, которому не служат помехой ни дробные, ни иррациональные количества и особый для этого род исчисления».

Метод Ньютона изложен им в ряде математических трудов, которые он очень неохотно и с большим опозданием опубликовывал и то лишь побуждаемый досадным спором с Лейбницем о приоритете. Наиболее вероятной датой открытия Ньютоном его метода являются годы 1666—1669, но первое сочинение его по этому вопросу появилось лишь в 1711 г., а главный материал — «Метод флюксий и бесконечных рядов» лишь в 1776 г.

Познакомимся теперь с содержанием открытия того и другого ученого, но пользоваться мы будем современным нам языком.

Метод Лейбница мы рассмотрим на задаче о касательной, а метод Ньютона — на задаче о мгновенной скорости.

**Задача о касательной.** Требуется найти аналитическое выражение касательной к кривой линии. Из курса алгебры вам известно, что всякой линии соответствует определенное уравнение. Например, прямая имеет графическое выражение $y = kx + b$, где $k$ — угловой коэффициент, а $b$ — отрезок, отсекаемый прямой на оси ординат (рис. 17). В общем виде можно сказать, что функция $y = f(x)$ может быть графически изображена какой-то линией в системе координат $x$, $y$. Изменение $x$ на какую-то величину $\Delta x$ вызывает соответствующее изменение $y$ на величину $\Delta y$. Таким образом, $y + \Delta y = f(x + \Delta x)$.

Тогда
$$\Delta y = f(x + \Delta x) - y,$$
или
$$\Delta y = f(x + \Delta x) - f(x).$$

Изобразив это на чертеже (рис. 18), будем приближать точку $B$ к точке $A$. Тогда секущая $AB$ будет приближаться к ка-

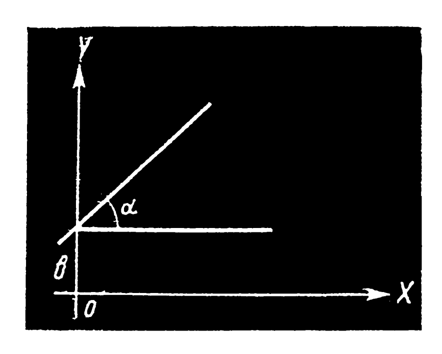



Рис. 17. Линейная функция.

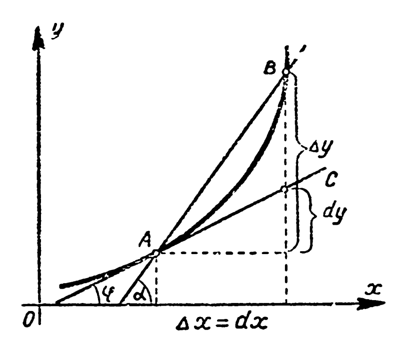



Рис. 18. Геометрическое значение производной.

сательной $AC$. Угловой коэффициент секущей (тангенс угла наклона секущей к оси $x$) будет выражаться отношением:

$$\frac{\Delta y}{\Delta x} = k.$$

Совершая предельный переход, можно для углового коэффициента касательной написать:

$$k = \lim_{\Delta x \to 0} \frac{\Delta y}{\Delta x}$$

(здесь lim — это сокращенное латинское слово limes — предел, а указание $\Delta x \to 0$ означает условие предельного перехода — неограниченное уменьшение $\Delta x$).

Лейбниц вместо такого способа записи предложил более простой, который сейчас и является общепринятым:

$$k = \frac{dy}{dx},$$

где $dy$ и $dx$ называются дифференциалами. Различие $dy$ от $\Delta y$ и тождественность $dx$ и $\Delta x$ видны на чертеже. Мы можем поэтому написать:

$$k = \frac{dy}{dx} = \lim_{\Delta x \to 0} \frac{\Delta y}{\Delta x} = \lim_{\Delta x \to 0} \frac{f(x + \Delta x) - f(x)}{\Delta x}.$$

Как видно из этого выражения, угловой коэффициент касательной сам является функцией $x$ и называется производной функцией или просто производной.

Лейбниц дал и единообразный для всех случаев прием нахождения производной функции. Поясним это на примерах.

Пример 1. Провести касательную к параболе $y = x^2$ в точке $M$ с координатами 3 и 9.

Угловой коэффициент находим в четыре приема (четыре шага):

1-й шаг: даем $x$ приращение $\Delta x$, тогда

$$y + \Delta y = (3 + \Delta x)^2 = 9 + 6\Delta x + (\Delta x)^2.$$

2-й шаг: находим приращение $\Delta y$:
$$\begin{array}{r} y + \Delta y = 9 + 6\Delta x + (\Delta x)^2 \\ - y = 9 \\ \hline \Delta y = 6\Delta x + (\Delta x)^2 \end{array}.$$

3-й шаг: берем отношение $\frac{\Delta y}{\Delta x}$: $\frac{\Delta y}{\Delta x} = \frac{6\Delta x + (\Delta x)^2}{\Delta x} = 6 + \Delta x.$

4-й шаг: переходим к пределу, устремляя $\Delta x$ к 0: $\lim\limits_{\Delta x \to 0} \frac{\Delta y}{\Delta x} = 6.$

Следовательно,

$$k = \frac{dy}{dx} = 6.$$

В общем виде для функции $y = x^2$ производная $\frac{dy}{dx} = 2x.$

П р и м е р 2. Найти производную функции $y = x^3$.
1-й шаг: $y + \Delta y = (x + \Delta x)^3 = x^3 + 3x^2\Delta x + 3x(\Delta x)^2 + (\Delta x)^3.$
2-й шаг: $\Delta y = 3x^2\Delta x + 3x(\Delta x)^2 + (\Delta x)^3.$

3-й шаг: $\frac{\Delta y}{\Delta x} = 3x^2 + 3x\Delta x + \Delta x^2.$

4-й шаг: $\frac{dy}{dx} = 3x^2.$

*Производная алгебраической суммы функций.* Пусть функция $y$ является алгебраической суммой нескольких функций от $x$:

$$y = u + v - w,$$

где $u$, $v$ и $w$ — функции от $x$.

Применим описанный выше прием нахождения производной.

1-й шаг: даем $x$ приращение $\Delta x$, тогда

$$y + \Delta y = u + \Delta u + v + \Delta v - w - \Delta w.$$

2-й шаг: находим приращение $\Delta y$:

$$\begin{array}{r} y + \Delta y = u + \Delta u + v + \Delta v - w - \Delta w. \\ - y = - u - v + w \\ \hline \Delta y = \Delta u + \Delta v - \Delta w \end{array}.$$

3-й шаг: берем отношение $\frac{\Delta y}{\Delta x}$: $\frac{\Delta y}{\Delta x} = \frac{\Delta u}{\Delta x} + \frac{\Delta v}{\Delta x} - \frac{\Delta w}{\Delta x}.$

4-й шаг: переходим к пределу, устремляя $\Delta x$ к 0:

$$\lim_{\Delta x \to 0} \frac{\Delta y}{\Delta x} = \lim_{\Delta x \to 0} \frac{\Delta u}{\Delta x} + \lim_{\Delta x \to 0} \frac{\Delta v}{\Delta x} - \lim_{\Delta x \to 0} \frac{\Delta w}{\Delta x}.$$

Следовательно,

$$\frac{dy}{dx}=\frac{du}{dx}+\frac{dv}{dx}-\frac{dw}{dx}.$$

Таким образом, производная алгебраической суммы нескольких функций от $x$ равна алгебраической сумме производных отдельных слагаемых.

*Производная произведения двух функций.* Пусть $y = uv$, где $u$ и $v$ функции от $x$. Применяя тот же прием, можно доказать, что производная произведения двух функций равна произведению первой функции на производную второй плюс произведение второй функции на производную первой, т. е.

$$\frac{dy}{dx}=u\frac{dv}{dx}+v\frac{du}{dx}.$$

*Производная дроби.* Производная функции $y=\frac{u}{v}$, где $u$ и $v$ являются функциями от $x$, равняется знаменателю, помноженному на производную числителя, минус числитель, умноженный на производную знаменателя, и эта разность делится на квадрат знаменателя:

$$\frac{dy}{dx}=\frac{v\frac{du}{dx}-u\frac{dv}{dx}}{v^2}.$$

Читатели могут самостоятельно вывести эти два правила, применяя тот же прием четырех шагов. Примеры для упражнения на применение правил нахождения производной суммы, произведения и частного мы дадим ниже.

Нахождение производной носит название дифференцирования. Вы,может быть, уже подметили правило, каким можно пользоваться при дифференцировании степенной функции $y = x^n$, не прибегая к утомительной операции в четыре шага? Вот это правило: производная степенной функции равна функции $x$ с коэффициентом, равным показателю степени первоначальной функции и с показателем степени, на единицу меньшим первоначального:

$$\frac{dy}{dx}=nx^{n-1}.$$

В случае, если у первоначальной функции коэффициент отличен от единицы, то он входит множителем в коэффициент производной функции. Так, если первоначальная функция

$$y = ax^n,$$

то производная функция $\frac{dy}{dx}=anx^{n-1}$.

Прежде чем читать дальше, поупражняйтесь в дифференцировании следующих функций:

1. $y = 5x^3 - 3x^2 + 6$. Ответ: $\frac{dy}{dx} = 15x^2 - 6x$.

2. $y = (2x + 3)(x^2 + 3x - 1)$. Ответ: $\frac{dy}{dx} = 6x^2 + 18x + 7$.

3. $y = \frac{x + a}{x - a}$. Ответ: $\frac{dy}{dx} = -\frac{2a}{(x - a)^2}$.

4. $y = x^5$. Ответ: $\frac{dy}{dx} = 5x^4$.

5. $y = \sqrt{x}$. Ответ: $\frac{dy}{dx} = \frac{1}{2\sqrt{x}}$.

**Прием, описанный выше, позволил находить производные и в более сложных случаях, но обычно дифференцирование производят не путем четырех последовательных шагов, а по готовым (полученным указанным способом) формулам. Вот важнейшие из них:**

| Первоначальная функция | Производная | Первоначальная функция | Производная |
|---|---|---|---|
| $y = a$ (постоянная величина) | $\frac{dy}{dx} = 0$ | $y = a^x$ | $\frac{dy}{dx} = a^x \ln a$ |
| $y = x$ | $\frac{dy}{dx} = 1$ | $y = \ln x$ | $\frac{dy}{dx} = \frac{1}{x}$ |
| $y = ax^n$ | $\frac{dy}{dx} = anx^{n-1}$ | | |
| $y = \sin x$ | $\frac{dy}{dx} = \cos x$ | $y = e^x$ | $\frac{dy}{dx} = e^x$ |

**Кроме основной задачи дифференциального исчисления — определения угла наклона касательной, дифференцирование функций позволяет определить, выпуклая или вогнутая кривая, возрастает функция или убывает. С помощью дифференцирования можно найти минимальные и максимальные значения функций. Вам, конечно, понятно, что все эти вопросы имеют значение не только для геометрии, но и много дают для характеристики функции, для исследования процесса изменения функции, а потому имеют огромное значение при решении многих физических и технических задач.**

**Задача о скорости. Допустим, что уравнение движения, выражающее зависимость перемещения тела (точки) от времени, представлено функцией** $s = f(t)$.

**Через некоторый промежуток времени** $\Delta t$ **перемещение увеличится и будет**

$$s + \Delta s = f(t + \Delta t),$$

а смещение за один только промежуток $\Delta t$ найдем по разности:

$$\Delta s = f(t + \Delta t) - f(t).$$

Средняя скорость за этот промежуток

$$v_{\text{ср}} = \frac{\Delta s}{\Delta t} = \frac{f(t + \Delta t) - f(t)}{\Delta t}.$$

Уменьшая промежуток времени и переходя к пределу при $\Delta t \to 0$, получим истинную скорость точки в момент $t$:

$$v = \lim_{\Delta \to 0} \frac{\Delta s}{\Delta t} = \lim_{\Delta t \to 0} \frac{f(t + \Delta t) - f(t)}{\Delta t}.$$

Этот предел представляет производную функцию от $f(t)$.

Для отличия ее от первоначальной функции $y = f(x)$ Ньютон обозначил ее $\dot{y}$; современное, более удобное обозначение ее $y'$ (игрек штрих). В нашем примере

$$v = s'.$$

Мгновенная скорость, таким образом, есть производная пути по времени, т. е. предел, к которому стремится средняя скорость при бесконечном уменьшении промежутка времени, в течение которого мы наблюдаем движение тела, считая от некоторого начального момента.

В элементарном учебнике физики (под ред. акад. Г. С. Ландсберга), в котором не применяется высшая математика, мгновенная скорость определяется как средняя скорость, измеренная за столь малый промежуток времени, что в течение его изменения скорости перестают улавливаться нашими измерительными приборами. Ведь чем меньше промежуток времени, тем меньше и изменения в скорости движения, и, наконец, изменения становятся неощутимыми. Этим ставится предел нашему стремлению получать все более и более точное описание движения. Понятно, что такое определение носит чисто практический характер. Вполне точное определение дает лишь, как было выяснено, высшая математика.

Пользуясь приведенным правилом, проверим формулу скорости свободного падения.

Уравнение движения:

$$h = \frac{gt^2}{2}.$$

Находим производную:

$$\frac{dh}{dt} = \frac{g}{2} \cdot 2t = gt.$$

Итак, $v = gt$.

**Понятие об интеграле.** В элементарной математике имеется четыре пары взаимно обратных действий:

| | |
|---|---|
| сложение | — вычитание |
| умножение | — деление |
| возведение в степень | — извлечение корня |
| логарифмирование | — потенцирование |

В высшей математике, основным понятием которой является понятие функции, мы встречаемся с двумя новыми взаимно обратными операциями: дифференцированием и интегрированием.

Дифференцирование позволяет по данной первоначальной функции находить ее производную, т. е. аналитически решать задачу о ходе изменения данной функции, определять скорость ее изменения. Интегрирование позволяет нам по известной скорости процесса восстановить сам процесс, или, выражаясь математическим языком, по производной функции находить первоначальную функцию.

Если вернуться к геометрическим представлениям, то интегрирование решает такую задачу: по уравнению касательной найти уравнение кривой, к которой эта касательная проведена.

Загляните в словарь иностранных слов, там вы найдете такое разъяснение значения слова «интегрировать» (от латинского inteqer — целый — восстанавливать, объединять в одно целое; в математике — по данной функции находить ее интеграл).

Чтобы лучше уяснить себе идею интегрирования, рассмотрим одну из основных задач интегрального исчисления — определение площади фигуры, ограниченной осью $x$, ординатами и кривой (или прямой), представляющей графически некоторую функцию $x$ (рис. 19) в пределах от $x = a$ до $x = b$. Для нахождения площади разобьем ее на участки линиями, параллельными оси ординат. Заменим временно полученные полоски более простыми и геометрически легко определимыми фигурами — прямоугольниками. Это можно сделать двумя способами: прямоугольники могут быть все расположены под кривой линией и тогда сумма их площадей будет меньше площади криволинейной фигуры, или же прямоугольники будут выступать своими уголками над кривой и тогда сумма их площадей будет больше искомой площади.

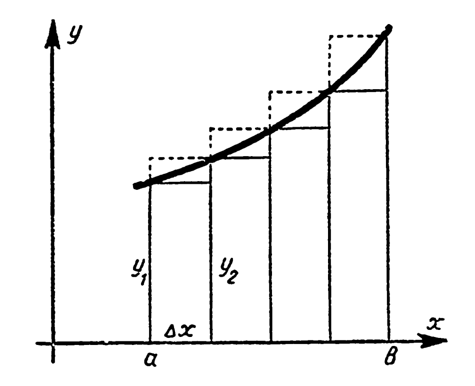


Рис. 19. Интеграл как площадь.

Площадь какого-нибудь одного прямоугольника из расположенных под кривой будет: $\Delta S_1 = y_1 \Delta x$,
а площадь выступающего прямоугольника $\Delta S_2 = y_2 \Delta x$.

Истинная же площадь криволинейной полоски $\Delta S$ будет заключаться между ними:

$$y_1 \Delta x < \Delta S < y_2 \Delta x.$$

Обратите внимание, что, разбив всю искомую площадь под кривой на прямоугольники, мы получили ступенчатую диаграмму, подобную часто применяемым диаграммам из прямоугольных столбиков для наглядного изображения какого-нибудь процесса, например роста выработки электроэнергии. Такие диаграммы позволяют сразу обозревать процесс изменения величины, т. е. выполняют задачу дифференциального исчисления. Суммирование же элементарных площадей подводит нас к обратной задаче — интегрированию.

Чем на большее число участков мы будем делить площадь, другими словами, чем меньше будут основания прямоугольников $\Delta x$, тем ближе будет площадь ступенчатой фигуры приближаться к искомой. Применив предельный переход, мы сумму площадей прямоугольников уже не отличим от площади искомой криволинейной фигуры. Лейбницем была предложена форма записи для результата предельного перехода

$$\int_a^b y dx$$

(читать: «интеграл от $a$ до $b$ игрек де икс»).

Символ $\int$ есть не что иное, как вытянутая буква $S$ — первая буква латинского слова summa (сумма). Отметим совпадение и с обозначением в формулах кинематики пути буквой $s$. Задача определения пути по скорости ведь тоже относится к основным задачам интегрального исчисления.

Величина интеграла будет зависеть как от основания фигуры $ab$ (пределов интегрирования), так и от формы кривой и представляет некоторую функцию от $x$, т. е. $F(x)$. Задача интегрирования — найти эту первоначальную функцию.

Входящая в подынтегральную часть функция $y$ является производной первоначальной функции $F(x)$:

$$\int y dx = F(x),$$

$$y = F'(x).$$

Например,

$$\int 3x^2 dx = x^3,$$

$$(x^3)' = 3x^2.$$

Когда первоначальная функция будет найдена (допустим, путем догадки с проверкой дифференцированием), то $x$ заменяется значениями верхнего и нижнего пределов интегрирования и из значения функции, соответствующего верхнему пределу, вычитается значение, получаемое при подстановке нижнего предела.

В приведенном примере $y = 3x^2$ представляет собой уравнение параболы (рис. 20). Если требуется найти площадь части, ограниченной значениями $x$, равными 1 и 2, то применяем такую форму записи:

$$\int_1^2 3x^2dx = \Big|_1^2 x^3 = 8 - 1 = 7 \text{ единиц площади.}$$

Отыскание первоначальной функции по догадке возможно лишь в простейших случаях. Значительно легче производить подбор по специальным формулам интегрирования. В учебниках по высшей математике вы найдете два десятка таких формул, здесь же мы ограничимся лишь важнейшими, которые могут нам пригодиться в дальнейших беседах:

$$\int dx = x,$$

$$\int x^a dx = \frac{x^{a+1}}{a+1},$$

$$\int \frac{dx}{x} = \ln x,$$

$$\int e^x dx = e^x,$$

$$\int \sin x dx = -\cos x$$

$$\int \cos x dx = \sin x.$$

Обратите внимание на первую формулу. Поскольку интегрирование и дифференцирование взаимно обратны, то знак интеграла и непосредственно следующий за ним знак дифференциала уничтожают один другого, подобно тому как уничтожаются знак извлечения корня и знак возведения в ту же степень:

$$\sqrt{a^2} = a, \text{ или } (\sqrt{a})^2 = a.$$

В приведенных формулах отсутствуют индексы $a$ и $b$, обозначающие пределы интегрирования. В этих случаях интегралы называются неопределенными, и следовало бы во всех формулах в правой части приписывать еще произвольное постоянное слагаемое $C$. Например.

$$\int x^2 dx = \frac{x^3}{3} + C,$$

где $C$ — любое постоянное число. Любое! В этом и состоит неопределенность. При проверке дифференцированием это постоянное число обращается, как мы знаем, в нуль:

$$\left(\frac{x^3}{3} + C\right)' = \frac{3x^2}{3} + 0 = x^2.$$

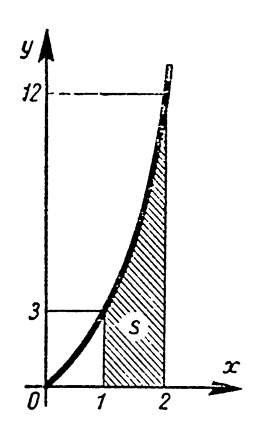



Рис. 20. Площадь, ограниченная параболой.

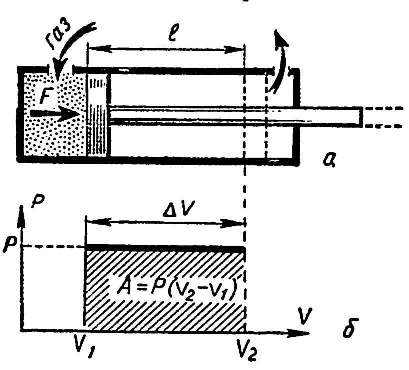



Рис. 21. Определение работы при изобарическом процессе.

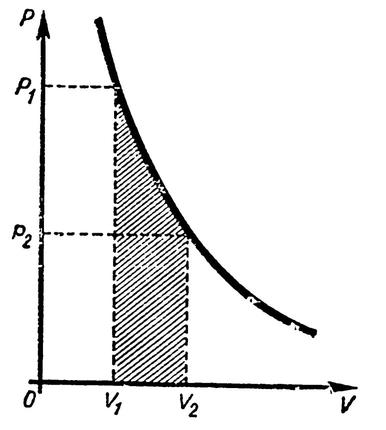



Рис. 22. Определение работы при изотермическом процессе.

Неопределенность исчезает, когда указаны границы интегрирования. Наша беседа не преследует цели научить вас всем тонкостям интегрирования. Ограничимся только рассмотрением еще одного примера применения интегралов в физике.

Пример. Определение работы газа при изотермическом процессе (закон Бойля—Мариотта).

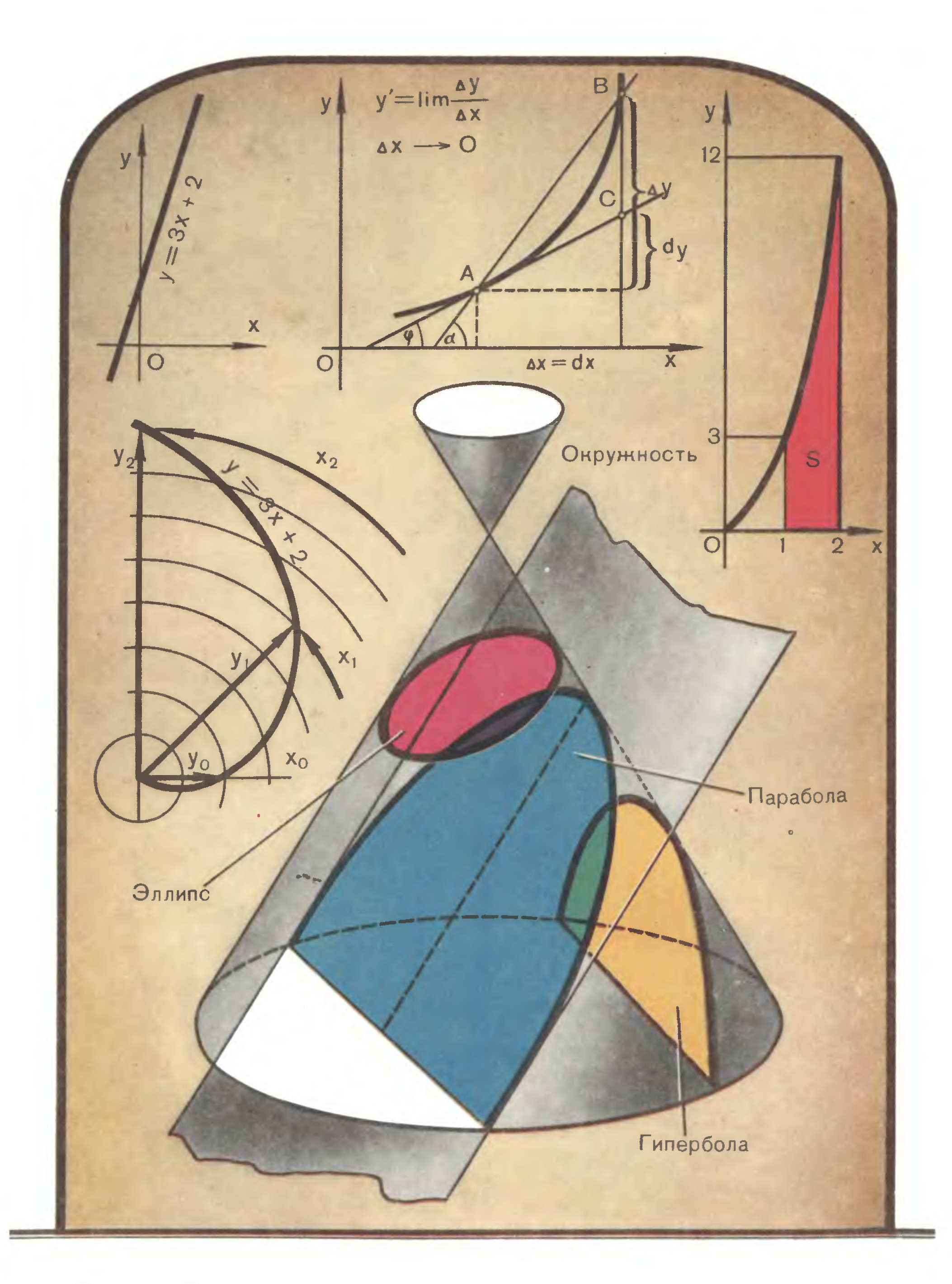
Если бы газ расширялся изобарически (при постоянном давлении), то работа газа была бы равна произведению силы давления на перемещение поршня в цилиндре, в котором помещен газ, $A = Fl$ (рис. 21, *а*). Сила давления, как известно, равна произведению давления на площадь поршня $F = pS$. Отсюда $A = pSl$. Но произведение $Sl$ равно приращению объема $\Delta V = V_2 - V_1$. Таким образом, $A = p(V_2 - V_1)$ (рис. 21, *б*).

В нашей задаче требуется определить работу расширения газа не при изобарическом, а при изотермическом процессе, когда давление не остается постоянным, а падает обратно пропорционально увеличению объема. На графике изменение давления в зависимости от изменения объема изображается гиперболой (рис. 22).

Разбив площадь под кривой на элементарные участки (прямоугольники), мы можем вычислить работу газа при изобарическом процессе (численно равна площади прямоугольника), а суммируя (беря интеграл) элементарные работы при бесконечном уменьшении приращения ($\Delta V \to 0$), вычислим и всю работу газа при изотермическом расширении от объема $V_1$ до объема $V_2$:




К статье «Если Вам семнадцать лет...».




К статье «Немного высшей математики».

$$A = \int_{V_1}^{V_2} pdV = \int_{V_1}^{V_2} \frac{pV}{V} dV.$$

Поскольку произведение объема на давление при изотермическом процессе есть величина постоянная, ее можно вынести за знак интеграла. Тогда

$$A = pV \int_{V_1}^{V_2} \frac{dV}{V}.$$

По формулам интегрирования (см. выше) $\int \frac{dV}{V} = \ln V$.

Поэтому, подставляя пределы интегрирования, получим:

$$A = p_1V_1 \Big|_{V_1}^{V_2} \ln V = p_1V_1 (\ln V_2 - \ln V_1) = p_1V_1 \ln \frac{V_2}{V_1}.$$

Чтобы можно было пользоваться не натуральными, а десятичными логарифмами, надо ввести переводный множитель 2,3. Тогда окончательно

$$A = 2{,}3 p_1V_1 \lg \frac{V_2}{V_1}.$$

Для упражнения решите следующую задачу: «Найти работу, которую совершит идеальный газ, взятый при начальном давлении 4 *ат* и расширяющийся от объема 1 *л* до объема 5 *л*». (Ответ: 640 *дж*).

Мы не будем задерживать больше ваше внимание на других расчетах с применением интегралов. Примеры, которые мы могли бы предложить вам, при небольшом запасе сообщенных сведений могли бы быть только самыми простыми и, пожалуй, не убедили бы вас в величайшей ценности такого метода исследования, как анализ бесконечно малых.

Академик Я. Б. Зельдович в своей превосходной книге «Высшая математика для начинающих» (М., Физматгиз, 1963), предлагая для начала читателям в виде упражнений вычислить площадь прямоугольного треугольника при помощи интегралов, делает такое шутливое замечание: «Не возмущайтесь, что приходится с трудом находить хорошо известный ответ $S = \frac{1}{2} bh$, потому что метод интегрирования применим там, где элементарные методы не дают ответа».

Мы настоятельно рекомендуем прочесть книгу Зельдовича тем, кто хотел бы подробнее познакомиться с вопросом. В книге приведены не только геометрические приложения дифференциального и интегрального исчисления, но и много физических задач: задачи на вытекание воды, радиоактивный распад, поглощение света; задачи на расчеты силы, работы, мощности; задачи на расчеты равновесия и устойчивости, импульса силы,

реактивного движения, определение центра тяжести и моментов инерции, задачи молекулярно-кинетической теории, расчет электрических цепей переменного тока и т. д.

Академик С. И. Вавилов в книге-биографии «Исаак Ньютон» (М., Изд-во АН СССР, 1945), подытоживая заслуги Ньютона в области математики, писал: «Великое открытие Ньютона и Лейбница — анализ бесконечно малых — продолжало неуклонно развиваться, развивается и теперь. Это — основная математическая форма современного естествознания и техники, и нет возможности учесть те неисчислимые благие результаты, которые принес с собой анализ в области теории и техники».

## ЭЛЕМЕНТЫ ВЕКТОРНОЙ АЛГЕБРЫ

В физике мы очень часто имеем дело с векторными величинами. Первое элементарное понятие о векторах было дано в I части наших «Бесед» в очерке «Математика стрелок». Там же приводились примеры на применение двух первых действий над векторами — сложение и вычитание векторов.

Сейчас мы уже имеем возможность больше рассказать о векторах и рассмотреть другие, более углубленные примеры применения векторных понятий в физике.

Векторное исчисление? Не думайте, что оно исчерпывается построением параллелограммов скоростей, силовых треугольников и многоугольников. Если хотите знать, векторное исчисление распадается на две части: векторную алгебру и векторный анализ. Но, разумеется, в нашей беседе мы ограничимся только основными понятиями, которые позволят вам глубже проникнуть в изучаемый вами курс физики. Много вопросов, над которыми вы до сих пор, быть может, и не задумывались, встанет перед вами.

Скорость есть векторная величина, сказано в любом учебнике физики; вектор скорости направлен по касательной к траектории движения, если речь идет о линейной скорости. А угловая скорость: векторная величина или нет? Если векторная, то каково же направление этого вектора?

Перемещение и сила — векторные величины. Почему же работа, величина которой получается от их перемножения ($A = Fs$), не является векторной величиной? А момент силы относительно оси ($M = Fl$), имеющий ту же размерность, что и работа, вектор или скаляр?

Из двух характеристик материального тела — импульса и энергии — какая является векторной?

Далее вы узнаете удивительные вещи: свойство переместительности при умножении скалярных величин (произведение не зависит от порядка сомножителей) не всегда верно для векторов. Известное правило, гласящее, что произведение равно

нулю, когда один из сомножителей равен нулю, тоже верно только для скалярных величин, для векторов же произведение может оказаться равным нулю и при отличных от нуля сомножителях. Известные вам из курса физики IX класса правила винта или правой руки оказываются тесно связанными со свойствами векторного произведения.

Но прежде всего, что же такое вектор? Перевод термина с латинского языка «вектор» — «несущий» еще недостаточно вскрывает природу этого рода величин.

Векторными величинами, или короче векторами, называются величины, характеризующиеся не только размером, но и направлением и, кроме того, подчиняющиеся правилам геометрического сложения. Не следует смешивать направленность вектора с относительностью отсчета, выражаемой алгебраическими знаками + и —. Ведь такие знаки показывают только направление от некоторой условной точки отсчета. Так, например, температура не является векторной величиной, и знак + или — при ее обозначении зависит только от выбора нуля отсчета: — 20°С и + 253°К обозначают одну и ту же температуру.

Введение векторов сильно упрощает процесс вычисления. Чтобы понять это, рассмотрим движение точки в пространственной системе координат.

В настоящее время наиболее распространена «правая система координат», в кото-

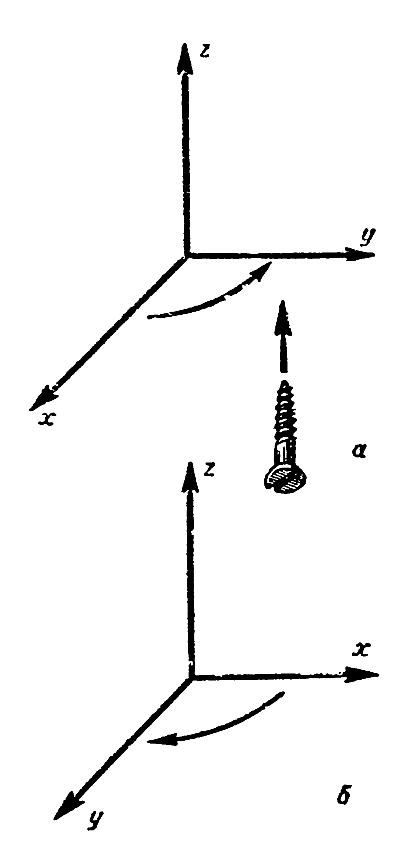



Рис. 23. Левая система координат (*а*); правая система координат (*б*).

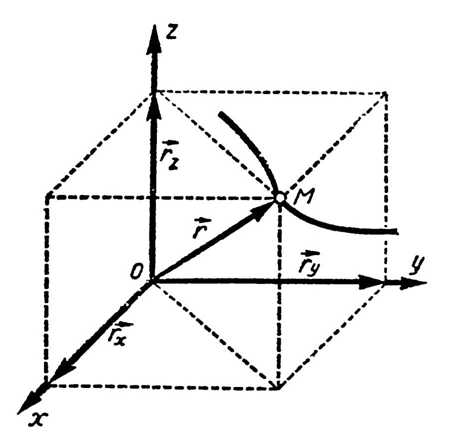



Рис. 24. Радиус-вектор.

рой, если смотреть сверху, «с конца» вертикальной оси, последовательная смена осей $x$ и $y$ происходит при вращении всей системы вокруг вертикальной оси против часовой стрелки (рис. 23, *а*). В этом нет ничего нового и необычного, ибо это согласуется с привычным правилом винта с правой нарезкой. В левой системе координат ось $x$ заняла бы положение оси $y$ при повороте системы по часовой стрелке (рис. 23, *б*).

Допустим, что мы хотим фиксировать положение точки $M$ (рис. 24) в пространстве. Линию, соединяющую точку $M$ с началом координат, называют радиус-вектором. При изменении положения точки, т. е. при ее движении, будет меняться и радиус-вектор. Скорость движения точки будет первой его производной по времени

$$\vec{v} = \frac{d\vec{r}}{dt},$$

где $r = F(t)$ (радиус-вектор есть функция времени).

Вместо этого можно было бы рассматривать три скалярных уравнения, каждое из которых представляет функцию, выражающую изменение проекции радиус-вектора на оси координат:

$$x = f(t),$$
$$y = \varphi(t),$$
$$z = \psi(t).$$

Не кажется ли все это вам, читатель, каким-то досадным запутыванием вопроса? Ведь задачи, которые вы привыкли решать в школе на движение поездов, снарядов и пр., были так просты, что вы даже не вспоминали (вот и напрасно!) о функциональной зависимости. Но ведь те задачи были нарочито упрощенными и относились к движению в одной плоскости. Совсем иное дело не школьные задачи, а исследование движения реального тела в пространстве, скажем космического корабля, направляющегося на Луну или Венеру. Язык векторов соответствует истинной физической сущности явления, а не упрощенной схеме.

Язык векторов сжат, выразителен, хотя и требует значительного напряжения ума, чтобы к нему привыкнуть. Академик А. Н. Крылов в своей книге «Мысли и материалы о преподавании механики» приводит следующие слова В. Томсона, предостерегающего от преждевременного введения векторного изложения механики в школе: «Векторы сберегают мел и расходуют мозг. Когда при координатном вычислении вы получили первое уравнение из трех, то остальные два вы получаете, делая как бы машинально круговую перестановку букв. В это время ваш мозг отдыхает. Когда же три полученных уравнения заменяются одним уравнением векториальным, то ваш мозг этого отдыха лишен». Однако тот же академик А. Н. Крылов считает целесообразным курс электротехники преподавать в векторном изложении, предпослав несколько вступительных лекций.

Слова эти были сказаны Томсоном давно, почти сто лет тому назад. Сейчас школьники строят управляемые по радио автомобили, кибернетические черепахи, изучают (программисты) обработку информаций, алгоритмы и принципы работы счетно-вычислительных машин, элементы анализа комплексных переменных (радиотехники). Поэтому не упрек в трудности моей книги хотел бы я услышать от читателей, а пожелание более полно познакомить их с причудливыми правилами векторного исчисления.

Мне приходит на память анекдот о знаменитом греческом математике Евклиде, жившем в царствование Птолемея I. Когда царственный ученик во время урока прервал его вопросом, нет ли более простого пути узнать геометрию, «продолжаем, возразил учитель, в математике нет царских путей». Итак, продолжаем!

Векторы на чертеже изображают отрезками, снабженными стрелками. Приняты следующие обозначения векторов: буквами латинского алфавита, напечатанными жирным шрифтом $\mathbf{a}$, $\mathbf{b}$, $\mathbf{c}$, ..., или буквами обычного шрифта с черточками или стрелками наверху $\vec{a}$ $(\bar{a})$, $\vec{b}$ $(\bar{b})$, $\vec{c}$ $(\bar{c})$, или двумя заглавными буквами, обозначающими начало и конец вектора, $\overrightarrow{AB}$, $\overrightarrow{AC}$... Численное значение вектора называют его модулем, величиной или длиной.

Два вектора считаются геометрически равными, если они имеют равные модули, параллельны и направлены в одну сторону. Отсюда вытекает возможность переносить вектор параллельно самому себе. Этим свойством пользуются при выполнении операций с векторами (сложение, вычитание, умножение). Отсюда же следует возможность перенесения начала вектора в любую точку на несущей его прямой. Так переносимые векторы называются «скользящими векторами». Вектор силы есть скользящий вектор — точку приложения силы можно переносить по линии ее действия.

Считая, что сложение и вычитание векторов (по правилу параллелограмма или треугольника) вам знакомо из наших предыдущих бесед (I часть, беседа «Математика стрелок»), обратимся к третьему действию над векторами — умножению.

**Умножение вектора на скаляр.** Умножение вектора на положительное число приводит только к изменению модуля вектора. Произведение будет вектором того же направления*. Такие векторы, лежащие на одной прямой или на параллельных прямых и отличающиеся только модулями, называются коллинеарными векторами.

**Умножение вектора на вектор.** Умножение двух векторов друг на друга дает в результате произведение, которое может быть скалярным или векторным.

---

* Конечно, умножение на отрицательное число приведет к изменению и направления вектора.

Скалярное произведение векторов равно произведению их модулей на косинус угла между ними. Форма записи скалярного произведения принята такая: $\vec{a} \cdot \vec{b}$ или $(\vec{a}\,\vec{b})$, т. е.

$$\vec{a} \cdot \vec{b} = ab \cos (\widehat{\vec{a},\ \vec{b}}).$$

Таким образом, скалярное произведение двух векторов есть скаляр; например, работа силы на некотором пути, рассматриваемая математически, есть скалярное произведение вектора силы на вектор перемещения:

$$A = \vec{F} \cdot \vec{s} = Fs \cos \alpha.$$

В зависимости от угла $\alpha$, образуемого силой с направлением перемещения, это произведение может быть положительным или отрицательным. Если же $\alpha = 90^\circ$, то произведение будет равно нулю: сила, направленная перпендикулярно к перемещению тела, работы не совершает. Например, при горизонтальном перемещении тела его вес представляет силу нормального давления, и при вычислении работы надо учитывать не вес тела, а силу трения, пропорциональную, конечно, силе нормального давления.

Другой специальный случай представляет скалярное произведение вектора на самого себя, например $(\vec{v})^2$. Согласно определению, данному выше,

$$(\vec{v})^2 = \vec{v} \cdot \vec{v} = vv \cos 0^\circ = v^2 \text{ — скаляр.}$$

Кинетическая энергия, пропорциональная квадрату скорости, поэтому является скалярной величиной, хотя скорость есть векторная величина.

С другой стороны, импульс $m\vec{v}$ как произведение вектора $\vec{v}$ на скаляр $m$ есть величина векторная.

Векторное произведение двух векторов есть вектор, модуль которого численно равен площади параллелограмма, построенного на векторах-сомножителях, а направление выбрано условно вдоль оси, перпендикулярной к плоскости параллелограмма, и притом так, что если смотреть с конца вектора произведения, то кратчайший переход от $\vec{a}$ к $\vec{b}$ происходит против часовой стрелки (рис. 25). Векторное произведение записывается так: $\vec{a} \times \vec{b}$, или $[\vec{a}\vec{b}]$ (для отличия от скалярного произведения знаком действия служит косой крест или квадратные скобки).

Понятно, что известное правило, гласящее, что произведение не зависит от порядка сомножителей (закон переместительности), к векторному произведению неприменимо — вектор произведения $[\vec{b}\vec{a}]$ был бы направлен вниз.

Из тригонометрии известно, что площадь параллелограмма равна произведению его сторон на синус угла между ними. Поэтому модуль векторного произведения будет равен $ab \sin \alpha$.

Отсюда неожиданный вывод:

$$\vec{a} \times \vec{a} = aa \sin 0^\circ = 0.$$

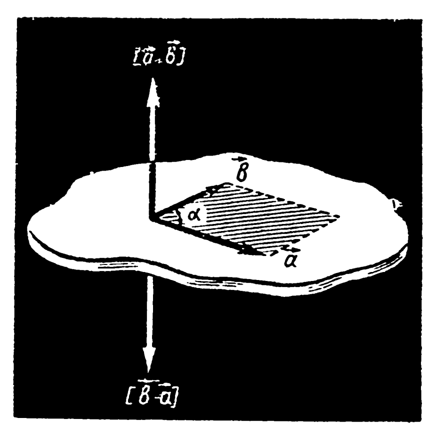



Рис. 25. Векторное произведение. Закон переместительности неприменим.

Мы видим теперь, как резко отличаются друг от друга векторы, полученные как векторное произведение векторов, и векторы, обозначающие направленные величины (радиальные векторы). Новые векторы, с которыми мы познакомились, разбирая векторное умножение, называются осевыми или аксиальными. Направление этих векторов, как было сказано, зависит от принятого условия (считать положительным вращение против или по часовой стрелке), а не от истинного направления обозначаемой ими величины. Поэтому осевые векторы называют иногда псевдовекторами*.

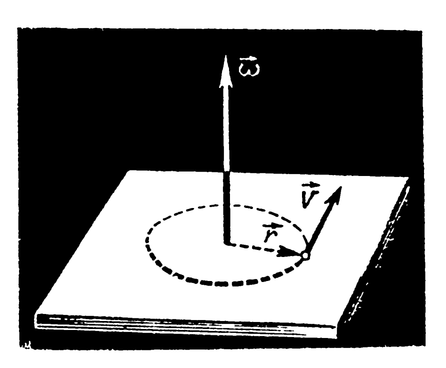



Рис. 26. Направление вектора угловой скорости.

Угловая скорость, о которой был поставлен вопрос в начале беседы, как раз и является псевдовектором.

Однако введение этого понятия не связано с векторным произведением. Направление вектора угловой скорости выбирается условно, в соответствии с вышеуказанным правилом определения направления, которое по сути дела представляет собой известное «правило винта». Вектор угловой скорости тела,

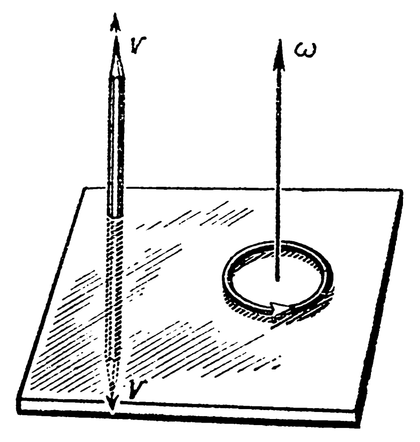



Рис. 27. Как отличить радиальный вектор от осевого?

---

* От греч. *псевдос* — ложь, *псевдовектор* — ложный вектор, «как бы вектор».

вращающегося вокруг неподвижной оси, направлен так, чтобы наблюдатель, смотря с конца этого вектора, видел вращение тела против часовой стрелки (рис. 26). Модуль же этого вектора определяется как первая производная углового перемещения тела по времени:

$$\omega = \frac{d\varphi}{dt}.$$

Известная из курса физики зависимость между угловой и линейной скоростью точки на расстоянии $r$ от оси ($\vec{v} = \vec{\omega} \times \vec{r}$) приводит к выводу, что линейная скорость есть векторное произведение угловой скорости на радиус. Однако это векторное произведение нельзя отнести к осевым векторам, так как линейная скорость — истинный вектор, характеризующий величину и направление скорости (по касательной к траектории точки). Это кажущееся противоречие с определением аксиальных векторов вызвано тем, что один из сомножителей ($\vec{\omega}$) сам является аксиальным вектором. В этом случае векторное произведение является радиальным вектором.

Отличить радиальный вектор от осевого можно по зеркальному отражению. Знак (направление) радиального вектора меняется в зеркале на обратный, осевого же — остается без изменения. Проверьте это на опыте (см. рис. 27), поставив на зеркало для первого случая очиненный карандаш острием вверх, в зеркале вы увидите острие карандаша обращенным вниз. Для второго случая положите на зеркало проволочное колечко с прикрепленным к нему указателем вращения против часовой стрелки. В зеркальном изображении это направление вращения остается неизменным, значит, не изменилось и направление вектора (вверх).

Рассмотрим несколько примеров осевых векторов, имеющих большое значение для физики.

*Момент силы.* В механике различают момент силы относительно точки, или центра моментов и момент силы относительно оси. Момент силы относительно точки есть векторная величина, равная векторному произведению радиус-вектора, проведенного из этой точки к началу вектора силы, на вектор силы (рис. 28):

$$\vec{M} = \vec{r} \times \vec{F}.$$

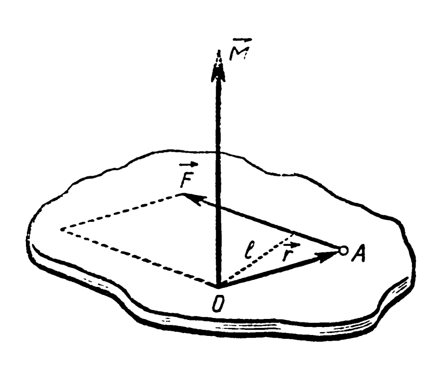


Рис. 28. Момент силы.

По свойству векторного произведения модуль вектора $\vec{M}$ численно равен площади параллелограмма, построенного на векторах-сомножителях. Площадь же параллелограмма можно вычислить, умножая ос-

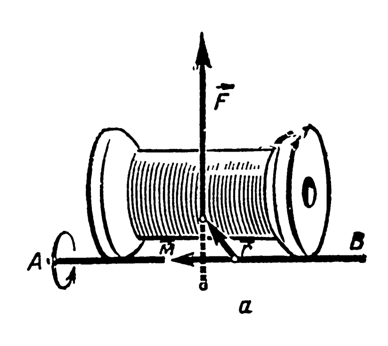
нование $F$ на высоту $l$. Тогда $M = Fl$, т. е. мы получили формулу для определения момента силы, известную вам из школьного курса физики: величина (т. е. модуль) момента силы равна произведению силы на плечо (перпендикуляр, опущенный из точки, относительно которой определяется момент, на линию действия силы). Скажите, положителен или отрицателен момент силы в приведенном примере?

Складывать моменты сил относительно точки (задача, которую приходится решать при рассмотрении вопроса о равновесии тела) надо по правилу сложения векторов — геометрически.

*Момент силы относительно оси.* В простейшем случае, когда силы расположены в плоскости, перпендикулярной к оси вращения, определение моментов сил относительно оси не отличается от определения моментов относительно точки. В более общем случае момент силы определяется как произведение проекции силы на плоскость, перпендикулярную к оси, на плечо. В этом случае моменты сил представляют собой скалярные величины и складывать их надо алгебраически.

«Непослушная» катушка. Рассмотрите в качестве примера на определение момента силы задачу о «непослушной» катушке и проверьте ваше решение на опыте — это несколько развлечет вас и позволит отдохнуть от наших затянувшихся, но необходимых рассуждений о векторных величинах.

Содержание задачи таково: «Катушка ниток упала на пол и закатилась под диван. Желая извлечь ее оттуда, вы тянете за нитку. Но если нитка натягивается



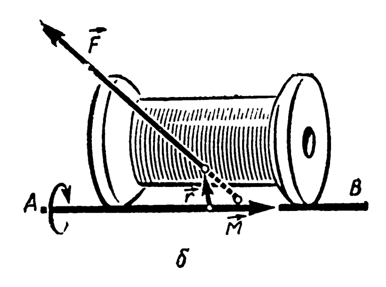




Рис. 29. «Непослушная» катушка.

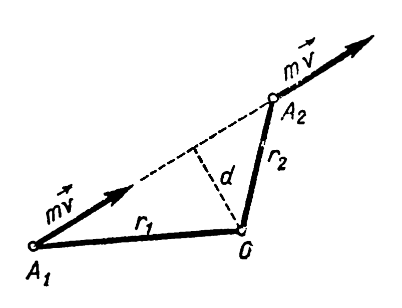



Рис. 30. К понятию момента количества движения.

под большим углом к горизонту, то катушка уходит от вас, прячась под диван все глубже и глубже. Только держа нить достаточно «плоско», можно вынудить к послушанию самую неподатливую катушку. Требуется объяснить явление».

Из чертежа (рис. 29 *а*, *б*) вы можете видеть, что катушка поворачивается не вокруг своей оси симметрии, а вокруг так называемой мгновенной оси — линии $AB$ соприкосновения с полом. В зависимости от угла, под которым будет приложена сила, линия действия силы пересекает пол то по ту, то по другую сторону мгновенной оси вращения. Вследствие этого меняется направление момента силы и направление вращения катушки. Приведя эту задачу-шутку, немецкий физик Р. Поль в своей книге «Механика, акустика и учение о теплоте» (М., Гостехтеориздат, 1957, стр. 97) заканчивает объяснение следующими словами: «Здесь, как и во многих других случаях жизни, немножко физики дает больше толку, чем самые бурные проявления темперамента».

*Момент количества движения.* Рассмотрим еще один пример векторной величины, имеющей огромное значение в различных практических и технических ситуациях.

Моментом количества движения, или моментом импульса тела относительно оси, называется вектор, направленный по оси (по правилу буравчика) и имеющий модуль, равный произведению импульса на длину перпендикуляра, опущенного на вектор импульса. Или, подобно тому как мы это видели в отношении момента силы, можно дать определение момента импульса как векторного произведения радиус-вектора на вектор импульса:

$$\vec{K} = \vec{r} \times m\vec{v}.$$

Обратите внимание, что хотя радиус-вектор при движении из положения $A_1$ в положение $A_2$ все время меняется, момент импульса материальной точки, движущейся равномерно и прямолинейно, все время остается постоянным, равным $m\vec{v}d$ (рис. 30).

То же можно сказать и про движение материальной точки по окружности. При равномерном движении момент импульса относительно оси, проходящей через центр окружности, остается постоянным.

Изменить момент импульса могут только внешние силы. Момент импульса всего тела, как состоящего из материальных точек, равен сумме моментов импульсов всех его частиц:

$$K = \sum mvr = \sum m\omega rr = \sum m\omega r^2 = \omega \sum mr^2.$$

Величина, стоящая под знаком суммы (вернее было бы, пользуясь интегральным исчислением, сказать «под знаком интеграла $\int mr^2$»), называется моментом инерции $J$; таким образом, $K = \omega J$. Момент инерции во вращательном движении играет такую же роль, как масса в поступательном (см. «Беседы по

физике», ч. I «Интересные и полезные параллели»). Так же как масса, момент инерции — скалярная величина.

Инертность вращательного движения зависит не только от массы тела, но и от распределения этой массы по отношению к оси вращения.

Момент инерции материальной точки, вращающейся по окружности радиуса $r$, равен $mr^2$. Устойчивость вращения маховых колес объясняется тем, что их масса в основном сосредоточена в ободе колес и потому момент инерции маховика значительно больше, чем сплошного цилиндра той же массы.

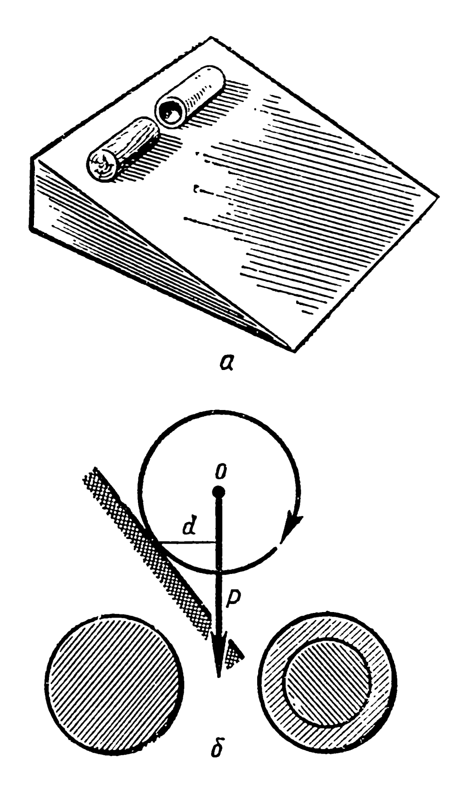



Рис. 31. К задаче о цилиндрах.

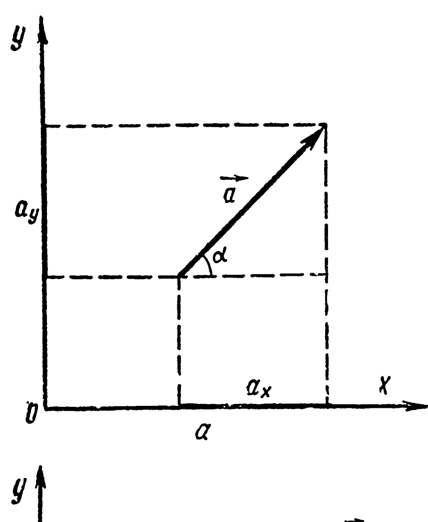
На физических олимпиадах или на конкурсных испытаниях часто предлагают решить задачу на скатывание с наклонной плоскости двух цилиндров одинаковой массы, но обладающих разными моментами инерции. Экзаменующегося, не знающего ничего о моментах инерции, такая задача может поставить в тупик. Рассмотрим два варианта этой задачи.

Задача № 1. Два цилиндра одинакового размера и массы сделаны из различного материала — один деревянный (сплошной), другой металлический (полый) (рис. 31, *а*). Какой из них скатится скорее с наклонной плоскости, если их пустить одновременно и с одинаковой высоты?

Ответ. Сплошной, так как у него момент инерции меньше; вращательные же моменты, сообщаемые силой тяжести цилиндра, одинаковы, и подобно тому как в поступательном движении ускорения, сообщаемые телам равными силами, обратно пропорциональны массам, так во вращательном движении цилиндр с меньшим моментом инерции получит большее ускорение и скатится раньше.

Задача № 2. Даны два цилиндра одинаковых размеров и из одинаковых материалов, но один сплошной, а другой составлен из двух цилиндров, вложенных один в другой (рис. 31, *б*). Какой из цилиндров скатится скорее при отсутствии трения?

Ответ. Составной, так как у него момент инерции наружного цилиндра меньше, чем у сплошного, сделанного из одного



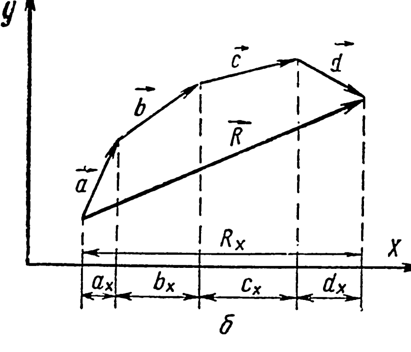




Рис. 32.

и того же материала. Внутренний цилиндр при отсутствии трения не вращается. Вращательные же моменты при одинаковом весе и размерах одинаковы. Следовательно, составной цилиндр получит большее ускорение.

Вы без труда теперь объясните, что придает головокружительное вращение фигуристке в балете на льду, когда она прижимает руки к туловищу, и почему должен сжиматься в комок цирковой артист, проделывающий сальто-мортале.

В заключение необходимо сделать следующее добавление: с переходом школы на новые программы векторной символике в учебниках стали придавать подобающее значение.

Ошибкой считается теперь запись второго закона Ньютона в виде $F = ma$ вместо правильного написания $\vec{F} = m\vec{a}$. В импульсной форме запись этого закона такова: $\vec{F}t = m\Delta\vec{v}$.

При определении равнодействующей нескольких сил надо писать:

$$\vec{R} = \vec{F}_1 + \vec{F}_2 + \vec{F}_3 + \dots ,$$

как бы ни были направлены отдельные силы. Даже в простейшем случае двух противоположно направленных сил надо записывать: $\vec{R} = \vec{F}_1 + \vec{F}_2$ и только для численного значения равнодействующей можно записать: $R = F_1 - F_2$.

Строго проводя векторную символику, мы точно выражаем физический смысл величин, фигурирующих в задаче. Но при расчетах мы от векторных величин переходим к соответствующим скалярным выражениям. Это значительно упрощает решение.

В учебниках и задачниках старых изданий встречалось необоснованное смешение векторов и скаляров.

Чтобы лучше понять, как надо поступать при решении задач с векторными величинами, мы должны познакомиться с понятием проекции вектора на оси координат.

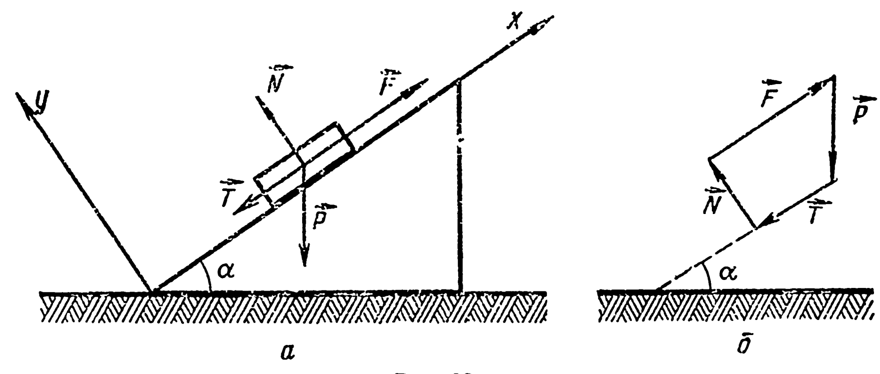


Рис. 33.

Отрезок прямой, соединяющий проекции начала и конца вектора на соответствующую ось, называют проекцией вектора на эту ось. Его величину находят из формул: $a_x = a\cos\alpha$; $a_y = a\sin\alpha$ (рис. 32, *а*). Проекция вектора на ось есть скаляр, а действия со скалярами — это обычные алгебраические действия, к которым мы привыкли еще с младших классов школы.

Проекция геометрической суммы нескольких векторов (например, равнодействующей нескольких сил) равна алгебраической сумме проекций слагаемых с учетом их знаков (проекция считается положительной, если составляющая вектора совпадает с направлением оси, и отрицательной, если составляющая направлена противоположно оси) (рис. 32, *б*).

Итак, ограничиваясь задачей на плоскости, мы можем вместо вектора применять две его проекции на ось $X$ и ось $Y$, или, как говорят сопоставить векторному выражению скалярное.

| Векторное выражение | Скалярное выражение |
|---|---|
| $\vec{a}$ | $a_x = a\cos\alpha,$ <br> $a_y = a\sin\alpha.$ |

При этом направление вектора определяется углом с осью координат $\alpha$, а числовое значение (модуль) по теореме Пифагора:

$$|\vec{a}| = \sqrt{a_x^2 + a_y^2}.$$

Приступающим к изучению координатного способа решения задач может показаться, что такая методика только излишне усложняет решение. Практика решения нескольких задач развеет это сомнение и покажет, что этот способ решения, напротив, позволяет избежать возможной путаницы и придает решению четкость.

Рассмотрим, например, такую задачу. Какую силу $\vec{F}$ нужно приложить к телу массой $m$, чтобы равномерно поднимать его по наклонной плоскости с углом наклона $\alpha$ к горизонту?

Коэффициент трения тела о плоскость $k$, сила направлена параллельно наклонной плоскости.

Сделав чертеж (рис. 33, *а*), выясним, какие силы действуют на тело. Это сила тяжести $\vec{P} = m\vec{g}$, сила $\vec{N}$ реакции наклонной плоскости, деформированной под действием тела, сила трения $\vec{T}$, направленная против соскальзывания тела по наклонной плоскости вниз, и искомая сила тяги $\vec{F}$.

Равномерное движение получится только тогда, когда равнодействующая всех сил, действующих на тело, равна нулю. Графически это означает, что многоугольник всех этих сил должен быть замкнутым (рис. 33, *б*). Для решения задачи мы воспользуемся методом проекций.

Найдем проекции всех сил на оси координат, и векторное равенство

$$\vec{R} = \vec{F} + m\vec{g} + \vec{T} + \vec{N} = m\vec{a} = 0$$

заменим двумя эквивалентными ему уравнениями скалярных величин в проекциях на оси координат. Из соображений удобства эти оси выберем так, чтобы ось $X$ была направлена вдоль наклонной плоскости, а ось $Y$ перпендикулярно к ней.

Уравнения проекций:

$$F - mg\sin\alpha - T = 0 \qquad (\text{на ось } X),$$
$$N - mg\cos\alpha = 0 \qquad (\text{на ось } Y).$$

Последнее равенство есть тождество, так как $N = mg\cos\alpha$; учитывая, что $T = kN$ и решая первое уравнение, получим

$$F = mg(\sin\alpha + k\cos\alpha).$$

Метод проекций однообразно и непротиворечиво применим и к кинематике, и к динамике, и к статике.

## В ПОТЕМКАХ
### (О СИСТЕМАХ ОТСЧЕТА И ОРИЕНТИРАХ)

Темной осенней ночью я заблудился на окраинах города, в котором вырос и прожил много лет. Странное, даже жуткое чувство охватывает тебя, когда, полностью потеряв ориентировку, не можешь определить, где находишься и куда надо идти. Одинаковые домики, одинаковые улицы, как в лесу, где все деревья кажутся одинаковыми и где путник кружит без надежды выбраться на дорогу. Наверно, и многим читателям знакомо подобное чувство растерянности, когда спросонок не можешь найти привычных, знакомых вещей.

Только ориентир делает движение уверенным и определенным. В воображаемом пространстве, лишенном каких-либо

других тел, движение теряет всякий смысл. Движение состоит в перемещении одного тела по отношению к другим телам.

Древние финикияне и греки в своих морских путешествиях ночью ориентировались по звездам, особенно по Полярной звезде, которая почти не меняет своего положения на небесном своде. Магнитная стрелка, по старинному поверью, устанавливается в направлении к Полярной звезде. Лишь в XVII веке было разработано учение о магнитных полюсах Земли, но и сейчас курс корабля устанавливается по компасу (магнитному или жироскопическому), а полет в космические бездны ориентируется по какой-либо звезде. Например, полет космической лаборатории к Марсу ориентировался на яркую звезду Канопус.

Нам уже приходилось говорить о том, как выбор тела отсчета или системы отсчета отражается на виде траектории тела (см. «Беседы по физике», I ч., очерк «Четыре затруднительных положения») и на относительной величине скорости. Вот еще пример, показывающий относительность понятия движения.

С летящего на большой высоте самолета сбрасывается груз, например почта для зимовщиков на дрейфующей льдине. Какова траектория полета этого груза? Ответ зависит от выбора системы отсчета. Если мы свяжем систему координат неподвижно с корпусом самолета, то для летчика на самолете полет сброшенного груза происходит по вертикальной линии (рис. 34,*а*).

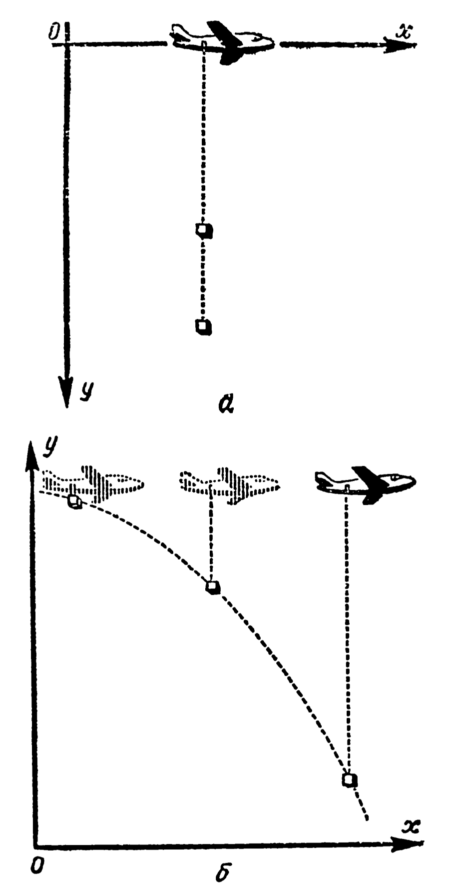



Рис. 34. Траектория падающего груза по отношению к самолету (*а*) и по отношению к Земле (*б*).




Рис. 35. Траектория падающего груза по отношению к грузу.

Если же за систему координат взять «неподвижную» Землю, то для находящегося на Земле наблюдателя траекторией груза будет парабола (рис. 34, *б*). И, наконец, если система координат связана с самим падающим грузом, то для воображаемого наблюдателя, поместившегося на грузе, груз (рис. 35) будет казаться неподвижным, подобно тому как неподвижными кажутся предметы пассажиру в вагоне с занавешенными окнами.

Невольно наша мысль обращается ко второму случаю, и мы склонны считать точку зрения наблюдателя, неподвижного по отношению к Земле, за истинную точку зрения, и на вопрос, как же в действительности летит падающий груз, нам (особенно если вспомнить первые уроки кинематики) хотелось бы сказать — по параболе. Но сделайте над собой усилие, чтобы преодолеть эту геоцентрическую точку зрения, и тогда вы поймете, что это просто «точка зрения», а в действительности груз движется по вертикальной прямой в первой системе отсчета, по параболе во второй и пребывает неподвижным в третьей. Мы могли бы даже дать объективное доказательство и путем эксперимента убедиться в этом на модели передвигаемого по горизонтально натянутому шнуру самолета, прикрепляя лист бумаги то к самолету, то к неподвижной раме, на которой укреплена вся установка. Сбрасываемый же груз мы должны снабдить каким-либо пишущим прибором, хотя бы кисточкой, смоченной краской. Все три траектории явятся объективным доказательством правильности наших предыдущих рассуждений.

При решении задач часто удачный выбор системы отсчета облегчает решение и быстрее приводит к ответу.

Рассмотрим хотя бы такую задачу (С. П. Стрелков, И. А. Эльцин, И. А. Яковлев. Сборник задач по общему курсу физики, задача № 8): «Рыбак едет на лодке вверх по реке; проезжая под мостом, он уронил в воду багор. Через полчаса он это обнаружил и, повернув назад, догнал багор в 5 *км* ниже моста. Какова скорость течения реки, если рыбак, двигаясь вверх и вниз по реке, греб одинаково?»

Допустим, что вы решаете эту задачу с точки зрения неподвижного наблюдателя на берегу. Тогда в расчет войдут три неизвестные величины: скорость течения реки $u$, скорость рыбака по отношению к берегам $v$ и время всего события $t$.

Уравнение движения для багра:

$$ut + s \qquad (s = 5 \text{ км}).$$

Расстояние, пройденное лодкой вверх:

$$s_1 = (v - u)\, t_1 \qquad (t_1 = 0{,}5 \text{ ч}).$$

Расстояние, пройденное лодкой вниз по реке:

$$s_2 = (v + u)(t - t_1).$$

Их разность: $s_2 - s_1 = ut$,

или

$$(v+u)(t-t_1)-(v-u)t_1=s.$$

Решая это уравнение, найдем:

$$t=1\ ч.$$

Тогда $u = 5$ *км/ч*.

Посмотрите, насколько упростится решение, если за систему отсчета принять систему координат, неподвижно связанную с багром.

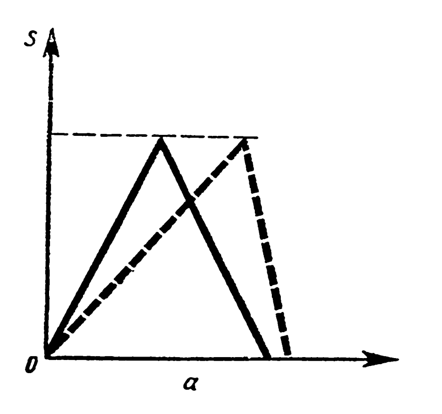
Для воображаемого наблюдателя, поместившегося на уплывающем багре, река будет представляться неподвижной, а берега, мост и рыбак будут удаляться в сторону, противоположную течению.

Сосредоточим внимание пока только на рыбаке. Полчаса он удалялся от багра по застывшей реке и, конечно, гребя одинаково, полчаса же будет возвращаться к багру. Следовательно, все событие, описанное в задаче, длится один час. За то же время мост удалился от багра на 5 *км* (в задаче сказано — багор от моста, но это одно и то же). С точки зрения, привычной нам, наблюдающим за течением реки и движением лодки с неподвижных берегов или с моста, вода уносит багор на 5 *км* за час, т. е. скорость течения равна 5 *км/ч*. Не правда ли, как просто? Известно, что до Коперника Землю большинство людей считало неподвижной и для объяснения движения планет по небесному своду пользовались сложной системой Птолемея. Все стало проще, когда Коперник предложил принимать за систему отсчета Солнце, а Землю поместил в число планет солнечной системы. И не только проще, но и логичнее.

Разберем еще такую задачу (В. Г. Зубов и В. П. Шальнов. Задачи по физике, задача № 7): «Одинаковое ли время потребуется для проезда расстояния в 1 *км* на катере туда и обратно по реке (скорость течения $v_р = 2$ *км/ч*) и по озеру (в стоячей воде), если скорость катера относительно воды в обоих случаях $v_к = 8$ *км/ч*?»

Мне кажется, одинаковое, скажет кто-нибудь. Ведь течение будет задерживать катер при движении вверх и ускорять при движении вниз одинаковым образом.

Последнее, конечно, правильно, но одинаковое ли время занимает путешествие вверх по реке и вниз на то же самое расстояние (относительно Земли)? Ведь движение против течения происходит с уменьшенной скоростью по сравнению со скоростью в стоячей воде, поэтому занимает на том же расстоянии больше времени, чем движение по течению с увеличенной скоростью. И все время в первом случае течение мешает движению, а во втором помогает. Получается, что течение мешает дольше, чем помогает, поэтому помехи не компенсируются помощью и потому на движение вверх и вниз по реке затрачивается больше времени, чем на движение туда и обратно на такое же расстояние в стоячей воде.



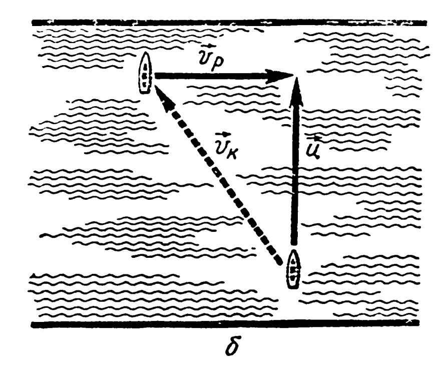




Рис. 36. Графическое решение задачи № 7 (*а*) и ее вариант (*б*).

Если вы склонны к геометрическим представлениям, то давайте рассмотрим этот вопрос графически.

Построим график пути в координатах $s$ и $t$ (рис. 36, *а*). Движение туда и обратно в стоячей воде графически представляется сторонами равнобедренного треугольника, а графиком движения по реке вверх будет более пологая прямая, а для движения вниз — более крутая, пересекающая ось времени $t$ несколько дальше, чем при возвращении из поездки по озеру.

Аналитическое решение задачи сводится к решению уравнений:

$$t_1 + t_2 = \frac{s}{v_к - v_р} + \frac{s}{v_к + v_р} = 16 \text{ мин (по реке)},$$

$$2t_0 = 2\frac{s}{v_к} \text{ (по озеру)},$$

$$2t_0 = 15 \text{ мин}.$$

Изменим теперь условие задачи. Пусть нужно узнать, сколько времени потребуется катеру, чтобы проплыть поперек той же реки 1 *км* в одну сторону и обратно.

Чтобы движение происходило строго поперек реки, катер должен держать курс под некоторым углом к этому направлению, иначе его будет относить в сторону.

Скорость движения поперек реки найдем по правилу сложения векторов (рис. 36, *б*).

$$\vec{u} = \vec{v}_к + \vec{v}_р,$$

$$u = \sqrt{v_к^2 - v_р^2}.$$

Тогда время, необходимое для поездки в одну сторону, будет равно:

$$t = \frac{s}{u}, \quad t = \frac{s}{\sqrt{v_к^2 - v_р^2}},$$

откуда $t = 7{,}8$ *мин*.

Такое же время потребуется и для возвращения обратно. Следовательно, на движение в оба конца будет затрачено 15,6 *мин.*

Из последующей беседы вы узнаете, какую огромную роль сыграла задача о движении вдоль и поперек течения в истории физики.

## «НЕУДАВШИЙСЯ» ОПЫТ

### (ОПЫТ МАЙКЕЛЬСОНА)

В предыдущей беседе мы детально разобрали задачу на тему: одинаковое ли время потребуется для проезда одного и того же расстояния на катере, если в одном случае движение происходит вдоль реки, а в другом — поперек? Мы выяснили, что на плавание по реке вверх и вниз затрачивается времени больше, чем на плавание на такое расстояние поперек реки туда и обратно (отношение времен составляет 16 : 15,6). Это отношение можно записать в форме

$$1 : \sqrt{1-\left(\frac{2}{8}\right)^2}.$$

Действительно, 16 : 15,6 = 4 : 3,9

и $1 : \sqrt{1-\left(\frac{2}{8}\right)^2} = 1 : \sqrt{1-\left(\frac{1}{4}\right)^2} = 1 : \sqrt{\frac{15}{16}} = 4 : 3{,}9.$

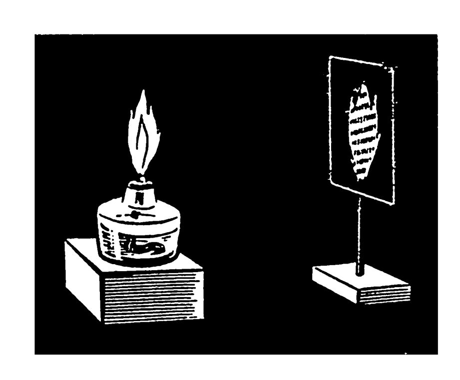
Зачем понадобилось так искусственно преобразовывать отношение, вы сейчас узнаете, пока же заметьте, что отношение продолжительностей плавания связано каким-то образом с отношением скорости течения к скорости плывущего объекта (2 : 8).

В 1881 г. американский физик Майкельсон поставил опыт, аналогичный рассмотренной задаче. Катером только была световая волна, которая, как известно, распространяется со скоростью 300 000 *км/сек*. Роль течения должно было играть относительное движение эфира (всепроникающей среды, в существовании которой были убеждены физики того времени).

Целью опыта Майкельсона было обнаружить абсолютное движение Земли в абсолютно покоящемся эфире. Подобно тому как при быстром движении в автомобиле или на велосипеде мы даже при совершенно безветренной погоде ощущаем ветер в лицо как результат нашего относительного перемещения, так и в опыте Майкельсона можно было с одинаковым правом говорить или о движении Земли в неподвижном эфире, или об эфирном ветре, налетающем на Землю.

Опыт Майкельсона сыграл огромную роль в истории науки и явился одним из экспериментальных оснований теории относительности. Но прежде чем познакомиться с этим опытом, вспомним некоторые сведения об интерференции волн. Интерфе-

ренция волн наблюдается, когда две когерентные волны, налагаясь одна на другую, создают в зависимости от разности фаз или усиление, или ослабление колебаний. Если волны идут с разностью фаз, соответствующей четному числу полуволн (0, 2, 4 и т. д.), амплитуды складываются и получается усиление колебаний. При этом у звуковых волн наблюдается усиление громкости, а в случае световых волн — увеличение яркости. При разности в нечетное число полуволн (1, 3, 5...) получается ослабление колебаний (затихание звука, ослабление или полное угасание света).



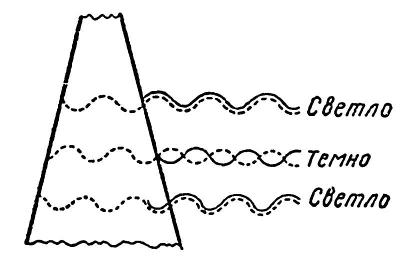



Рис. 37. Интерференционные полосы на мыльной пленке.

Интерференция света легко наблюдается, например, при отражении монохроматического пучка света (например, красного) от стенок тонкой мыльной пленки, принявшей под влиянием тяжести клинообразную, утолщенную книзу форму (рис. 37). Как видно из рисунка, в некоторых местах световые волны, отраженные от задней и от передней поверхностей пленки, совпадают по фазам, а потому, налагаясь, усиливают друг друга. Здесь мы видим светлые полосы. В других местах световые волны имеют противоположные фазы колебаний и, налагаясь, ослабляют друг друга. Там мы видим темные полосы.

Майкельсон в своем опыте применил изобретенный им прибор — интерферометр (рис. 38, *а*). Рассмотрите внимательно чертеж, показывающий ход луча света.

Параллельный пучок лучей от источника света $L$ падает на стеклянную посеребренную полупрозрачную пластинку $P$ с коэффициентом отражения равным $^1/_2$, поставленную под углом 45°, и разделяется на два пучка: I, проходящий через пластинку и идущий к зеркалу $S_1$, и II, отраженный в направлении на зеркало $S_2$. Оба пучка, отразившись от зеркал $S_1$ и $S_2$, попадают через зрительную трубу $T$ в глаз наблюдателя. Допустим, что Земля неподвижна. Тогда, пройдя равные расстояния от пластинки до зеркал и отразившись обратно, оба луча идут по направлению к трубе без сдвига фаз. Наблюдатель видит интерференционную картину из ряда чередующихся темных и светлых полос (рис. 38, *б*). Теперь посмотрим, что по-

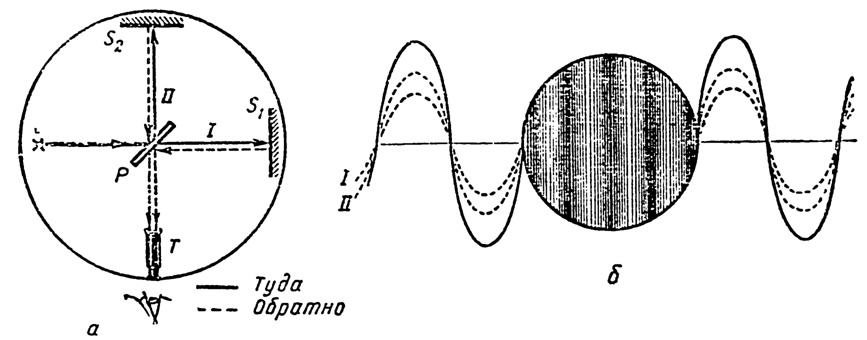


Рис. 38. Схема интерферометра Майкельсона (*а*); интерференционные полосы (*б*).

лучится, если интерферометр установлен на движущейся Земле и притом так, что направление пучка I совпадает с направлением движения Земли, или, что все равно, противоположно направлению «эфирного ветра». Направление пучка II перпендикулярно направлению движения Земли. Оба пучка проходят одинаковый путь от пластинки до зеркал и обратно. Как видите, получается полная аналогия с задачей о катере на реке. Для пучка света вдоль течения «эфирного потока» (движения Земли) время прохождения расстояния $l$ от пластины $P$ до зеркала $S_1$ и обратно:

$$t_1 = \frac{l}{c+v} + \frac{l}{c-v} = \frac{2lc}{c^2 - v^2} = \frac{2l}{c\left[1-\left(\frac{v}{c}\right)^2\right]},$$

где $l$ — расстояние от пластины до зеркала, $v$ — скорость движения Земли (скорость «эфирного ветра»), $c$ — скорость света в неподвижном эфире.

Скорость пучка света поперек «эфирного ветра» (или поперек направления движения Земли) $u$ найдем из векторного треугольника (рис. 39):

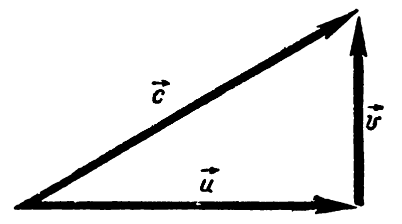
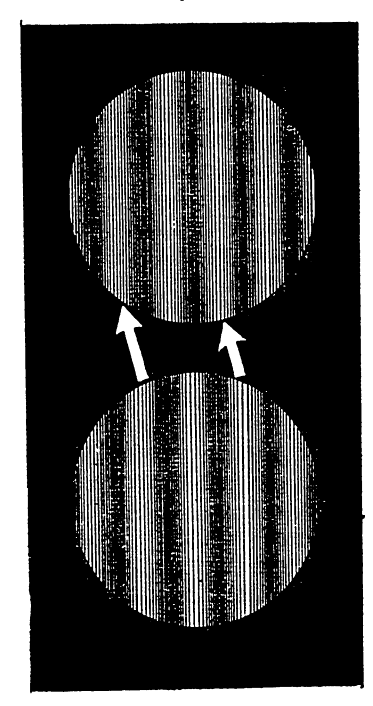


Рис. 39. К опыту Майкельсона.


Рис. 40. Ожидавшийся сдвиг интерференционных полос.

$$u^2 + v^2 = c^2, \quad u = c\sqrt{1 - \left(\frac{v}{c}\right)^2}.$$

Поэтому время для пробегания светом пути от пластинки до зеркала $S_2$ и обратно:

$$t_2 = \frac{2l}{c\sqrt{1 - \left(\frac{v}{c}\right)^2}}.$$

Поскольку

$$\left[1 - \left(\frac{v}{c}\right)^2\right] < \sqrt{1 - \left(\frac{v}{c}\right)^2},$$

то и

$$t_2 < t_1.$$

Иначе говоря, волны света приходят в трубу в разных фазах и наблюдатель должен отметить сдвиг интерференционных полос по сравнению с картиной на неподвижной Земле (рис. 40).

Если повернуть прибор на 90°, т. е. поменять роли пучков I и II, то сдвиг полос должен произойти в другую сторону. Опыты повторялись много раз различными учеными и всегда давали отрицательный результат — никакого сдвига полос не обнаруживалось, хотя точность прибора позволяла бы подметить и гораздо меньшие сдвиги, чем предсказывала теория. (Последний опыт проводился Ч. Таунсом в 1960 г.) Да! Опыт решительно «не удался». Обнаружить эфирный ветер, или, что то же самое, движение Земли, оказалось невозможным.

Какой же вывод приходилось сделать? Земля неподвижна? Но все в нас протестует против такого возврата к системе Птолемея. У нас имеется много экспериментальных доказательств движения Земли (вспомните хотя бы опыт Фуко), не считая логических. Кто же в XIX веке, когда впервые проводился этот опыт, мог согласиться с предположением, что гигантское Солнце, в 1 300 000 раз большее нашей планеты, обращается вокруг земного шара? А звезды, такие же, как Солнце, — огромные клубки раскаленной плазмы, отстоящие от нас на расстояниях, измеряемых уже не километрами, а годами, сотнями, тысячами и миллионами световых лет? Какие невероятные, чудовищные скорости должны были бы они иметь, чтобы поспевать заканчивать свой оборот вокруг крошки Земли в 24 часа!

Для спасения положения ирландский физик Фицджеральд высказал гипотезу, объяснявшую неудачу опыта Майкельсона тем, что под влиянием встречного эфирного ветра размеры прибора в направлении движения Земли сокращаются и тем компенсируют кинематический эффект. Уменьшение скорости волны света под влиянием эфирного течения в точности соответствовало уменьшению пути вследствие сокращения и потому время для прохождения этого пути оставалось таким же, как

если бы ни эфирного ветра, ни сокращения не было. Лоренц (Голландия) независимо от Фицджеральда пришел к тому же выводу, причем пытался обосновать свою гипотезу с позиций электронной теории. Электромагнитное поле должно было, по его расчетам, вызывать сокращение диаметров орбит электронов а следовательно, и всего тела в отношении

$$\sqrt{1-\left(\frac{v}{c}\right)^2} : 1.$$

Это сокращение и получило название сокращения Фицджеральда — Лоренца.

В большинстве книг, популярно рассказывающих о теории относительности, в том месте рассказа, где говорится о сокращении Фицджеральда — Лоренца, упоминается о приключении девочки Алисы из английской сказки для детей «Алиса в стране чудес». В сказке рассказывается, как Алиса, проглотив некое чудодейственное снадобье, уменьшилась до размеров в несколько дюймов высоты и очутилась в волшебном мире малых вещей, где с ней происходит ряд удивительных приключений. Однако авторы-популяризаторы теории относительности забывают сказать, что сократилась в размерах только сама Алиса, а предметы окружающего мира — цветы, грибы, гусеницы — остались прежними (рис. 41). Ведь только в таком случае Алиса и могла подметить чудесное действие проглоченного лекарства. Доказать же сокращение движущихся с Землей предметов в опыте Майкельсона не удается никаким образом.



Рис. 41. Алиса в стране чудес.

А разве нельзя в этом убедиться простым измерением? Или сокращение слишком мало?

Действительно, в большинстве случаев сокращение ничтожно. Например, диаметр Земли (около 12 000 *км*) при ее движении по орбите со скоростью 30 *км/сек* сокращается приблизительно на 6 *см*! Однако при скоростях, приближающихся к скорости света, сокращение становится уже значительным. При скорости 260 000 *км/сек* сокращение составляет уже половину первоначального размера. Космонавт в фотонной ракете, движущейся при такой скорости, расположившись вдоль оси ракеты, сократился бы вдвое. Но мог бы он это заметить? Ни в коем случае. Ведь и линейка или мерная лента, которыми он пытался бы измерить себя, испытали бы те же сокращения. А может быть, попытаться обнаружить изменение размеров линейки? Если положить линейку сначала поперек, а потом

вдоль ракеты, разве не мог бы космонавт увидеть чудесные изменения, происходящие с линейкой при поворачивании? Нет! Ему казалось бы, что с линейкой ничего не происходит. Ведь изображение линейки получается на сетчатке глаза, который испытывает изменения размеров в том же отношении, что и линейка, так что обнаружить эффект сокращения не удается. Какие бы приборы вы ни предлагали, ничто не поможет, — сокращения обнаружить нельзя!

Таким образом, объяснение Фицджеральда — Лоренца остается чисто формальным, придуманным только для того, чтобы как-то обосновать результат опыта Майкельсона. Основная причина этого заключается в том, что в рассуждении Лоренца оставалось нетронутым еще одно понятие — время, считавшееся абсолютным. Посягнуть на абсолютный характер времени никому и в голову не приходило... до Эйнштейна. Что это значит, поговорим об этом в следующей беседе.

## ПОСТУЛАТЫ ЭЙНШТЕЙНА

«Заключите себя с каким-нибудь приятелем в возможно просторном помещении под палубой большого корабля и пустите туда мух, бабочек и других подобных маленьких летающих животных. Пусть будет там также большой сосуд с водой и в нем рыбки. Повесьте также на потолок ведро, из которого капля за каплей вытекала бы вода в другой сосуд с узким отверстием, находящийся внизу под ним. Пока не движется корабль, наблюдайте, как эти летающие животные с равной быстротой будут летать во все стороны комнаты. Увидите, что рыбы будут плавать безразлично во все стороны; падающие капли будут попадать все в подставленный сосуд. И вы, бросая приятелю какую-нибудь вещь, не будете принуждены употреблять большую силу, чтобы бросить ее в одну сторону, чем в другую, если только расстояния одинаковы. Прыгая, вы будете проходить одинаковые пространства, куда бы вы ни прыгали. Наблюдайте хорошенько за всем и заставьте привести в движение корабль с какой угодно быстротой. Если движение будет равномерным, то вы не заметите ни малейшей перемены во всех указанных действиях и ни по одному из них не в состоянии будете судить, движется ли корабль или стоит на месте. Вы, прыгая, будете проходить по полу те же самые пространства, как и прежде, т. е. вы не сделаете вследствие того, что корабль движется весьма быстро, бóльших прыжков к корме, чем к носу корабля, хотя в то время, когда вы находитесь в воздухе, пол, находящийся под вами, бежит к части, противоположной вашему прыжку. Бросая вещь товарищу, вам не нужно с большей силой бросать ее, если он будет около носа корабля, вы же около кормы, чем наоборот. Капли будут падать, как прежде, в нижний сосуд, и ни одна не упадет по направлению к корме, не-

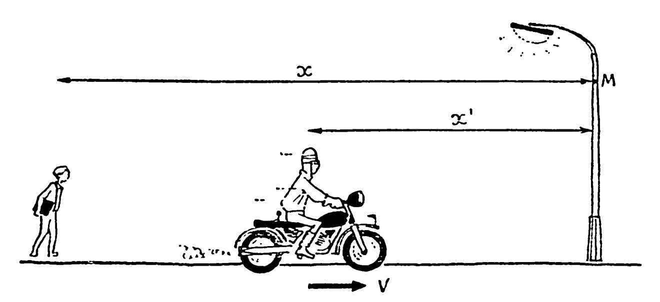


Рис. 42. Преобразования Галилея.

смотря на то, что, в то время как капля находится в воздухе, корабль уходит вперед на несколько локтей. Рыбы в своей воде не с большим трудом будут плавать к одной, чем к другой стороне сосуда и будут проходить с одинаковой ловкостью к пище, положенной на какое угодно место края сосуда. Наконец, бабочки и мухи будут летать по-прежнему во все стороны и не будут держаться более около той стены, которая ближе к корме, как будто устали следовать за быстрым ходом корабля, от которого они, находившись долго в воздухе, как будто разъединены... А причина того, что все эти действия так соответствуют одно другому, заключается в том, что движение корабля обще всему, находящемуся в нем, — и воздуху. Для этого нужно, говорил я, чтобы мы находились под палубой».

Эта большая цитата взята из книги Г. Галилея «Диалоги о двух системах мира» (1632 г.) — книги, едва не стоившей жизни ее автору. В этой картине за триста лет до Эйнштейна выражен принцип относительности механических движений. Коротко его можно сформулировать так: «законы механических движений остаются без изменений, или, выражаясь научным языком, являются инвариантными* независимо от того, находится ли система тел в покое или движется равномерно и прямолинейно».

Мы можем придать этому принципу более строгую, математическую форму. Посмотрите на рисунок 42. Вы видите двух наблюдателей: одного, стоящего неподвижно, другого, мчащегося с постоянной скоростью на мотоцикле. Свяжем как с неподвижным, так и движущимся наблюдателями самостоятельные системы координат $x$, $y$, $z$ и $x'$, $y'$, $z'$. Тогда очевидно, что координаты какой-нибудь точки $M$ (уличный фонарь) будут относительно этих систем взаимно связаны следующими уравнениями:

| Для движущегося наблюдателя: | Для неподвижного наблюдателя |
|---|---|
| $x' = x - vt'$ | $x = x' + vt$ |
| $y' = y$ | $y = y'$ |
| $z' = z$ | $z = z'$ |

* «Вариант» — изменение, «ин» — отрицание.

Присоединив сюда еще равенство $t' = t$, показывающее что время, как это считается в классической механике, течет одинаково для движущегося и неподвижного наблюдателей, мы получим так называемые «преобразования Галилея»*.

Дифференцируя первые равенства по времени, мы получим закон сложения скоростей: скорость тела относительно неподвижной системы координат (в примере Галилея — скорость бабочки относительно неподвижной воды моря) равна скорости относительно движущейся системы (стен комнаты внутри корабля) плюс скорость самой системы (корабля относительно воды), другими словами, абсолютная скорость ($v_{абс}$) равна относительной скорости ($v_{отн}$) плюс переносная скорость ($v_{пер}$).

$$\vec{v}_{авс} = \vec{v}_{отн} + \vec{v}_{пер}.$$

Если тело в движущейся равномерно системе само движется с ускорением (вода каплет из ведра в подставленный сосуд), то для установления зависимости между ускорениями мы должны продифференцировать уравнение скоростей (напомним, что производной определяется скорость изменения функции и, следовательно, производная скорости есть ускорение):

$$\frac{d\vec{v}}{dt} = \vec{a}.$$

Скорость $v_{пер}$ по условию постоянна, а производная постоянной равна нулю. Следовательно,

$$\vec{a} = \vec{a}' + 0, \text{ или } \vec{a} = \vec{a}',$$

т. е., в то время как смещение и скорость являются величинами относительными, зависящими от того, покоится система или движется равномерно и прямолинейно, ускорение в этом случае абсолютно и от движения системы не зависит.

Преобразования Галилея позволяют все законы движения выразить после подстановки приведенных выше соотношений одинаковыми формулами (без штриха или со штрихом), что и подтверждает принцип относительности Галилея: никакими опытами нельзя установить, находится ли система в покое или в равномерном и прямолинейном движении.

Понятие относительности движения было ясно и Ньютону, но, признавая относительность движения и покоя, Ньютон в то же время считал, что следует отличать относительное или кажущееся движение тел от их истинного движения в абсолютном пространстве и абсолютном времени. Желая уточнить понятия пространства, времени, места, движения, он писал: «Эти понятия общеизвестны, однако необходимо заметить, что они отно-

---

* Вышеприведенные формулы только названы галилеевыми преобразованиями. Сам Галилей их не выводил, так как не пользовался еще ни методом координат, ни дифференциальным исчислением.

сятся обыкновенно к тому, что постигается нашими чувствами. Отсюда происходят неправильные суждения, для устранения которых необходимо вышеприведенные понятия разделить на абсолютные и относительные, истинные и кажущиеся, математические и обыденные.

I. Абсолютное, истинное, математическое время само по себе и по своей сущности без всякого отношения к чему-либо внешнему протекает равномерно и иначе называется длительностью.

II. Абсолютное пространство по самой своей сущности безотносительно к чему бы то ни было внешнему остается всегда одинаковым и неподвижным...

III. Место есть часть пространства, занимаемого телом, и по отношению к пространству бывает или абсолютным, или относительным.

IV. Абсолютное движение есть перемещение тела из одного абсолютного места в другое...»

Но разве это не так? Если бы все в мире исчезло — люди, животные, растения, Земля, Солнце, звезды, разве не осталось бы пустое, геометрическое пространство? И разве в этом случае прекратилось бы течение времени? Ведь так легко мы представляем неизменным поток времени в веках, бывших раньше нас! Неужели не существуют ни от чего не зависящие абсолютное пространство и абсолютное время? Нет! Оторванное от материи, геометрическое пространство есть абстракция нашего ума, отвлеченное понятие, равно как и оторванное от явлений материального мира время. Всякая вещь существует где-нибудь и когда-нибудь. Само слово «существует» уже включает в себя понятие места нахождения и длительность пребывания. Пространство, лишенное заключенных в нем вещей, и время, лишенное происходящих процессов, — прямая дорога к идеализму. «Время вне временных вещей — бог», — делает пометку В. И. Ленин на полях своего конспекта «Лекции о сущности религии. Фейербах». На таком идеалистическом пути стоял Ньютон (XVII в.), который в своих «Началах» писал: «Бог продолжает быть всегда и присутствует всюду, всегда и везде существуя; он установил пространство и продолжительность». Материалистическая же философия рассматривает время и пространство как формы существования движущейся материи. Движение материи проявляется в форме относительных изменений материальных тел (вещества и поля). Отрывать пространство от пространственных тел и время от временных явлений — значит лишать смысла сами эти понятия.

Поиски неподвижной системы координат, к которой можно было отнести «абсолютное движение», оказывались безнадежными. Со времен Коперника мы знаем, что Земля, которую, казалось бы, проще всего принять за тело отсчета, не находится в покое. Перенос начала координат все дальше и дальше — на Солнце, в сферу далеких звезд не приносил решения проблемы: все эти объекты сами находятся в движении. Попытка фи-

зиков XVIII—XIX веков заполнить мировое пространство неподвижным всепроникающим эфиром и по отношению к нему, как к телу отсчета, определять движение Земли и других тел окончилась, как вы знаете из предыдущей беседы, неудачей. Преобразования Галилея не удовлетворяли «эфирной системе отсчета» — скорость света вдоль и поперек движения Земли в «неподвижном» эфире оказывалась одинаковой, т. е. не соблюдался закон сложения скоростей. Вот тогда-то Лоренц и выдвинул свою знаменитую теорию сокращения продольных размеров движущегося тела и дал формулы, позволявшие вычислить это сокращение. Формулы получили название преобразований Лоренца. Формула изменения координаты, направленной вдоль движения, включает в себя

$$\sqrt{1-\frac{v^2}{c^2}}.$$

Вот эти формулы:

$$x'=\frac{x-vt}{\sqrt{1-\frac{v^2}{c^2}}},\qquad y'=y,\quad z'=z,\qquad t'=\frac{t-\frac{v}{c^2}x}{\sqrt{1-\frac{v^2}{c^2}}}.$$

Выходило, что эфир как бы давит на движущиеся предметы и вызывает сокращение их размеров в направлении движения. Остальные размеры остаются без изменения. Нечто подобное можно наблюдать, рассматривая свое изображение в цилиндрическом выпуклом зеркале в «комнате смеха» в парке культуры и отдыха. Ваши вертикальные размеры остаются такими же, как и при рассматривании в обычном плоском зеркале, горизонтальные же карикатурно сокращаются (рис. 43). Сокращаются также и размеры горизонтально повернутой линейки, так что измерить свое сокращение в зеркальном мире невозможно.

Когда дроби $\frac{v^2}{c^2}$ и $\frac{v}{c^2}$ очень малы, т. е. когда система движется со скоростью очень далекой от скорости света ($v \ll c$), можно ими пренебречь, и тогда формулы превращаются в старые галилеевы преобразования.

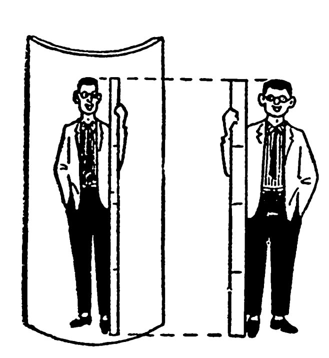


Рис. 43. Сокращения в цилиндрическом зеркале.

Но формулы лоренцевых сокращений даже самому Лоренцу казались искусственными, имеющими чисто служебную роль — объяснить причину неудачи опыта Майкельсона.

---

* Появление в знаменателе $\sqrt{1-\frac{v^2}{c^2}}$ можно понять из анализа задачи о катере, плывущем вдоль и поперек реки, проведенного в двух предыдущих беседах («В потемках» и «Неудавшийся опыт»).

Особенно невероятным казалось замедление времени в движущейся системе. Промежуток времени между началом и концом какого-нибудь процесса для движущегося наблюдателя увеличивается, как это видно из формулы. Часы у движущегося наблюдателя идут медленнее и к моменту окончания процесса покажут меньше, чем часы неподвижного наблюдателя. Сама мысль о возможности различного течения времени в разных системах казалась абсурдной.

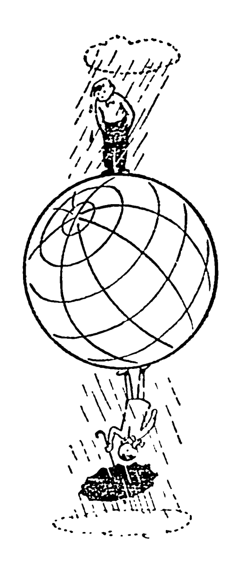


Рис. 44. Антиподы.

Где же выход из создавшегося затруднительного положения? Необходимо было пересмотреть привычные понятия о времени и пространстве. Но это значило идти против здравого смысла. Но что такое здравый смысл, как не выработанная в течение лет, десятилетий, веков привычка? До того как была доказана шарообразность Земли, разве не казалась абсурдной мысль об антиподах — людях, находящихся на противоположной стороне земного шара (рис. 44)? Христианский писатель Лактанций (IV в). считал мнение об антиподах безумием.

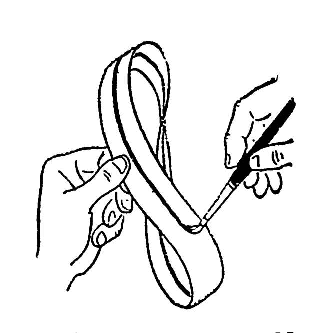


Рис. 45. Поверхность Мебиуса — односторонняя.

«Что же сказать о тех, — пишет он, — которые думают, что существуют люди, противостоящие стопам нашим, называемые антиподами? Что же сказать об этом? И будет ли кто-либо таким глупым, чтобы поверить, что есть люди, ноги у которых выше головы? Или то, что у нас лежит, у них, наоборот, висит? Плоды и деревья растут в обратном порядке? Дождь и снег и град падают на землю снизу вверх?»

Максим Грек, писатель XVI века, мнения «аристотельские» (о шарообразности Земли) называет «чужими баснями, растлевающими добрые обычаи».

А жестокая борьба против учения Коперника о вращении Земли разве не искала опоры в здравом смысле, согласно которому очевидным казалось вращение небесного свода вокруг Земли?

Давайте проверим, свободны ли и вы, читатели, от власти «здравого смысла». Попробуйте преодолеть в себе такое привычное представление: лист бумаги или ткани имеет две стороны (лицо и изнанку). Не так ли? Не противоречит ли здравому

смыслу утверждение, что возможен лист с одной только поверхностью? Но проделайте такой опыт: вырежьте из бумаги полоску и склейте ее концы, как показано на рисунке 45. Начните теперь покрывать краской поверхность вашей полоски, водя по ней кистью до тех пор, пока не вернетесь к исходному пункту. Вы не отрывали кисть от бумаги, вы шли все время по одной и той же поверхности, назовем ее по привычке лицевой. А изнанка? Посмотрите, неокрашенной поверхности не оказывается! Поверхность Мебиуса, так называется эта форма поверхности, не имеет изнанки!

Обратимся, однако, к теории относительности Эйнштейна. Больше шестидесяти лет прошло с тех пор, как мало кому известный инженер, служащий в швейцарском патентном бюро, Альберт Эйнштейн опубликовал статью «К электродинамике движущихся тел», в которой изложил основные положения так называемой специальной, или частной, теории относительности, но до сих пор его выводы поражают и вызывают сомнения у сторонников суждения с точки зрения здравого смысла. Для физика же важнейшим судьей является опыт, а опыт как раз подтверждает теорию относительности. Мало того, выводы теории относительности положены в основу современной атомной и ядерной физики.

Чтение самой статьи Эйнштейна требует от читателя специальной математической подготовки, и большинство людей знакомо с принципами теории относительности по популярным книгам, излагающим основные идеи теории, равно как и поразительные, парадоксальные выводы из нее. В нашей беседе мы рассмотрим только то, что необходимо для понимания современной физики. Об общей теории относительности речь пойдет в следующей беседе.

В основе частной теории относительности лежат два исходных положения, два постулата:

1. Наш мир так устроен, что не существует способа определить, находится ли тело в покое или движется равномерно и прямолинейно.

В отличие от галилеева принципа относительности, в котором утверждалась независимость (инвариантность) законов механики, постулат Эйнштейна распространяет эту инвариантность на все физические процессы: механические, оптические, электрические и т. д. Покой и движение при этом понимаются, конечно, относительно другой системы.

2. Наш мир так устроен, что скорость света в вакууме не зависит от того, находится ли источник света в покое или же движется равномерно и прямолинейно.

Общая теория относительности отбрасывает последнее ограничение и распространяет эти постулаты на любые движения.

Предоставим теперь слово самому Эйнштейну (цитируем по написанному им общедоступному изложению теории относительности: А. Эйнштейн. «О специальной и общей теории от-

Рис. 46. Одновременно ли ударила молния в точках *А* и *В*?

носительности» русский перевод, 1922). «В двух далеко друг от друга удаленных местах железной дороги *А* и *В* ударила молния (рис. 46). К этому я присоединяю, что оба удара последовали одновременно. Если я спрошу тебя, любезный читатель, имеет ли какой-либо смысл это утверждение, то, конечно, ты ответишь мне убежденным «да». Но если я буду настаивать на более точном разъяснении смысла этого утверждения, то после некоторого раздумья ты заметишь, что ответ на этот вопрос не так прост, как кажется на первый взгляд.

После некоторого размышления ты предложишь мне следующим образом установить одновременность. Соединяющий оба места отрезок *АВ* будет измерен по рельсам и в середине его будет поставлен наблюдатель. Последний снабжен приспособлением (например, двумя поставленными друг к другу под углом в 90° зеркалами), позволяющим ему одновременно видеть оба места *А* и

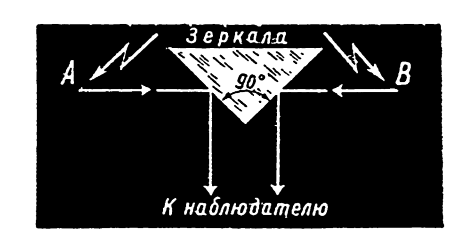



Рис. 47. Зеркала под углом в 90° позволяют одновременно видеть точки *А* и *В*.

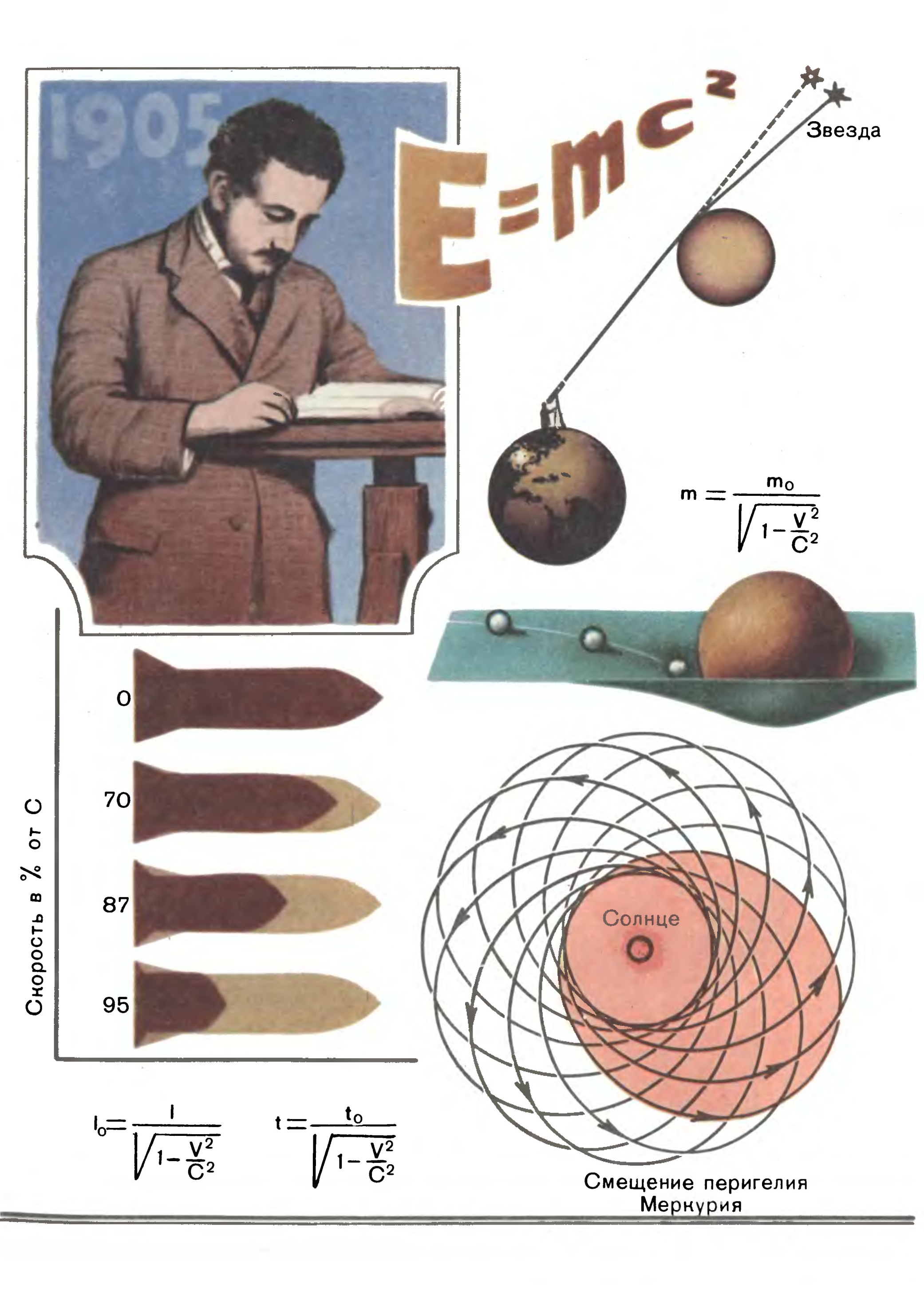
*B* (рис. 47). Если теперь наблюдатель одновременно воспримет оба удара молнии, то, значит, они одновременны. Пусть по рельсам идет очень длинный поезд с постоянной скоростью *v* в указанном на рисунке направлении.

Пассажиры его с удобством примут свой поезд за то твердое исходное тело (систему координат), к которому они будут приурочивать все события. Всякое событие, совершающееся вдоль полотна железной дороги, происходит также у определенного пункта поезда. Возникает следующий вопрос. Два события (например, два удара молнии *A* и *B*), одновременные по отношению к железнодорожному полотну, будут ли также одновременны по отношению к поезду? Мы сейчас убедимся, что ответ будет отрицателен.

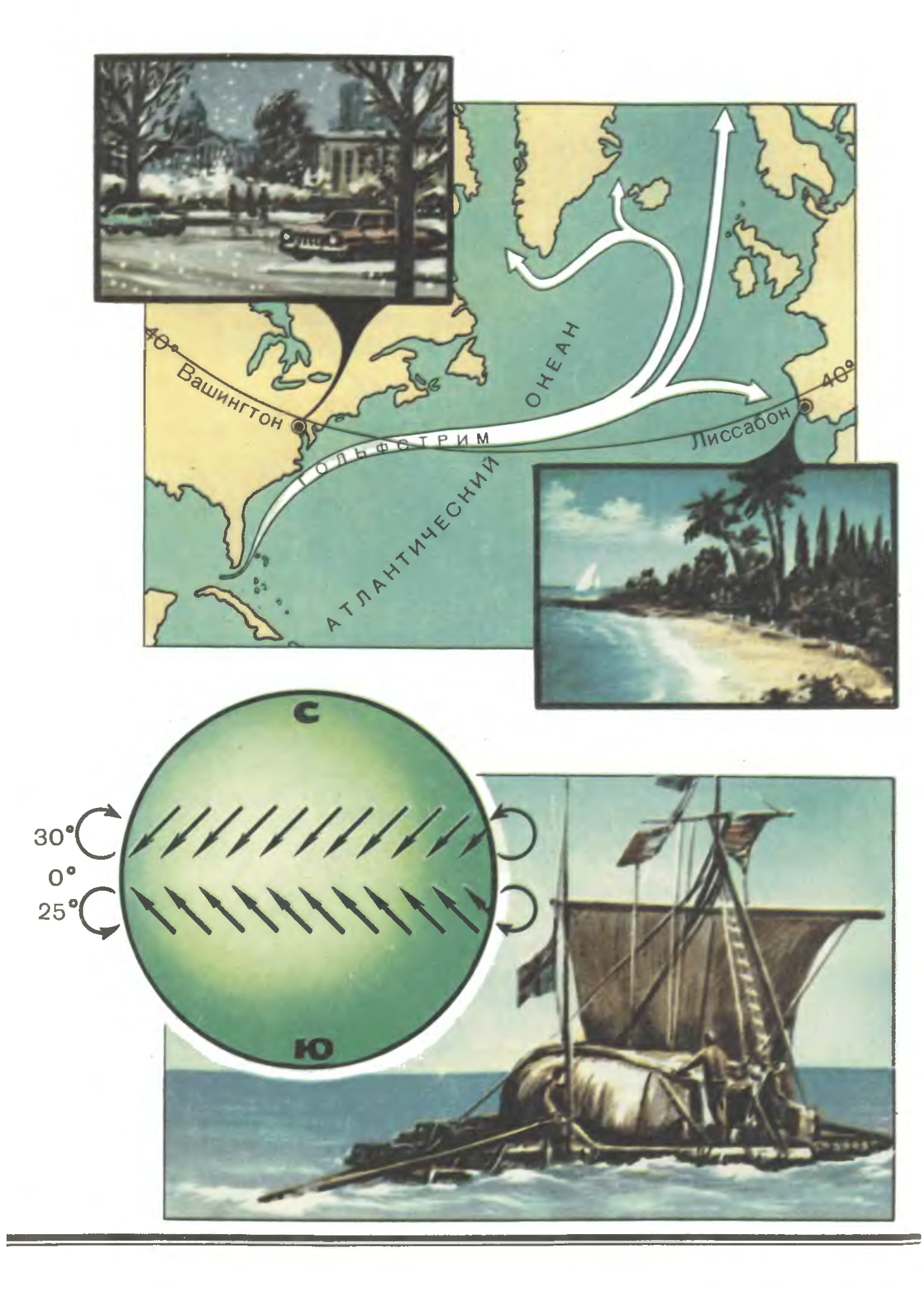
Когда мы говорим, что удары молний одновременны по отношению к насыпи, то это означает следующее: лучи света, выходящие из мест удара молнии *A* и *B*, встречаются в середине *M* участка насыпи *AB*. Но событиям *A* и *B* соответствуют также места *A* и *B* в поезде; *M'* есть середина участка *AB* поезда. Пункт *M'* в момент удара молнии (если судить с полотна дороги) совпадает с пунктом *M*, но он движется, как показано на рисунке, направо со скоростью поезда *v*. Если бы наблюдатель, сидящий в поезде в пункте *M'* не подвигался с той же скоростью, а все время оставался в пункте *M*, то оба световых луча от молний *A* и *B* достигли его одновременно, т. е. встретились бы как раз у него. Но в действительности наблюдатель движется (если судить с полотна дороги) навстречу лучу света, идущему из *B*, и удаляется от луча, нагоняющего из *A*. Поэтому он раньше увидит луч из *B*, чем луч из *A*. Следовательно, пассажиры, для которых вагон служит исходным телом, должны будут прийти к заключению, что удар молнии в *B* произошел раньше, чем в *A*. Мы приходим таким образом к следующему важному выводу.

События, которые одновременны в отношении к железнодорожному полотну, не одновременны в отношении к поезду, и наоборот (относительность одновременности). Каждое исходное тело (система координат) имеет свое особое время. Указание времени только тогда получает смысл, когда указано исходное тело, к которому оно относится».

Вот вы выслушали самого Эйнштейна. Но вряд ли вы освободились от чувства удивления: как это может быть, что два наблюдателя одного и того же события — удара молнии в *A* и *B* — утверждают, что для одного из них это произошло одновременно, а для другого не одновременно? Еще удивительнее то, что в подтверждение своих наблюдений они могут предъявить не субъективные, а вполне объективные доказательства: наблюдатель на полотне может представить фотографическую пластинку, запечатлевшую две молнии одновременно, а пассажир в поезде — два последовательных снимка с одной-единственной молнией на каждом.




К статье «Постулаты Эйнштейна».




К статье «Когда несправедлив закон инерции».

Где же истина? Разве не противоречат одно другому эти утверждения об одном и том же реальном событии, подтвержденные к тому же двумя различными, но вполне реальными доказательствами (фотографиями)? Однако противоречия тут никакого нет. Противоречием было бы, если бы мы сказали, что удары молний, рассматриваемые сами по себе, и одновременны, и неодновременны. Правильно следует сказать: молнии одновременны относительно полотна дороги, но они не одновременны относительно движущегося поезда. Вдумайтесь в это, прежде чем читать дальше.

Разумеется, речь идет об одновременности двух событий, происходящих в двух удаленных друг от друга местах. Если же события разыгрываются в одном месте, то их одновременность бесспорна для любой системы, как неподвижной, так и движущейся.

Точно так же нет ничего относительного в понятиях «позже» и «раньше» для событий, которые являются причиной и следствием одно другого. Ни в какой системе отсчета не может быть, чтобы ребенок родился раньше матери (а вы как думаете?) или чтобы возможны были события, подобные описанным в книге «Занимательная механика» Я. И. Перельмана в главе «Занимательная прогулка в страну Эйнштейна».

«Мы ехали во всю прыть наших неказистых кляч. Прямая и ровная дорога шла густым лесом. Местность считалась «нечистой»; говорили, что здесь пошаливают. Кучер то и дело боязливо оглядывался и не переставал погонять лошадей, которые, впрочем, при каждом ударе только вскидывали головами, но не прибавляли шага.

Со мной ехал мистер Барней. Он сидел на облучке, повернувшись ко мне, спиной к лошадям и что-то рассказывал. Вдруг он вскрикнул, схватился за грудь и опрокинулся назад.

— Что с ним? — воскликнул я.

— Убит. Пуля попала в сердце.

— Кто же стрелял?

— Вероятно, этот негодяй Клио собирается выстрелить.

— Вы говорите «собирается»; но ведь мистер Барней уже убит!

— Да, убит. Я и говорю, что убийцей будет Клио. Поглядите, вон он скачет за нами. Держу пари, что он нагонит нас через 10 минут.

Град ударов посыпался на коренника; но несчастная кляча предпочитала работать головой, чем ногами, так что наша скорость не изменилась. Я оглянулся. Вдали по дороге, нагоняя нас, быстро несся всадник. На всем скаку он поднял ружье и начал прицеливаться. Я невольно пригнулся и намеревался соскользнуть на дно повозки.

— Не бойтесь, он целится в Барнея, — сказал кучер, ткнув кнутом в сторону трупа, лежавшего у моих ног.

— Зачем же в него стрелять, раз он уже мертв? — спросил я.

— Чудак вы! Ведь Клио нас догоняет, значит, мистер Барней для него еще жив.

— В таком случае надо его укрыть, — воскликнул я, хватаясь за труп и стараясь стащить его вниз.

— Чего же его прятать, когда он мертв? — возразил кучер.

Вдруг блестящая мысль осенила меня.

— Погодите же, — закричал я. — Я сейчас подстрелю этого негодяя! Сказано — сделано. Бац! Клио свалился мертвый.

— Он не успел выстрелить! — радостно воскликнул я. Выстрел, который должен был убить мистера Барнея, никогда не будет произведен.

— Разумеется, — согласился кучер. — После смерти не выстрелишь.

— Значит, мистер Барней спасен!

— Где там спасен, когда у него в сердце пуля сидит. Нет, его не воскресишь. Он уж похолодел.

— Какая пуля? Ведь Клио не выстрелил и никогда не выстрелит. Не может же в вашем сумасшедшем мире пуля, которая никогда не вылетит из ружья, находиться в сердце мистера Барнея?

— Ну уж... не могу вам объяснить... — ответил кучер. В голосе его была растерянность. — А только вы напрасно насчет нашего мира выражаться изволите. Сами же нас выдумали, запутались, да нас же еще и попрекаете. Нехорошо, сударь....»

Вся эта юмореска направлена, конечно, против псевдонаучных фантастических приключений, к сожалению, появляющихся иногда в печати. События, о которых только что рассказано, не имеют ничего общего с теорией относительности. Мир, в котором следствия могут предшествовать причинам, решительно ни на что не годится.

Однако, может возразить читатель, пример, приводимый самим Эйнштейном, относительной оценки одновременности ударов двух молний, кажется, мало чем отличается от только что описанного случая с мистером Барнеем. Для движущегося с поездом пассажира молния $B$ ударила раньше молнии $A$, тогда как для неподвижного наблюдателя оба удара были одновременны.

Но, во-первых, эти два явления не зависят одно от другого и не представляют причину и следствие. Допустим, молния $B$ ударила в здание и вызвала пожар. Пожар — это следствие удара молнии, и для движущегося, и для неподвижного наблюдателей он наступает после удара молнии, хотя регистрируется в различное время по часам того и другого наблюдателя.

Для движущегося наблюдателя время течет медленнее и тем медленнее, чем больше его скорость. Согласно преобразованиям Лоренца, замедление происходит в отношении $1 : \sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}$.

Если стрелка часов неподвижного наблюдателя в момент удара молнии показывает 0,0, то у пассажира в поезде она еще не успела дойти до этого места циферблата; иначе говоря, пожар, вызванный молнией, будет им зарегистрирован раньше (хотя, конечно, после удара молнии). Конечно, при небольшом расстоянии, какое отделяет место удара молнии от наших наблюдателей, различие во времени ничтожно. Но все же, как видите, нет никаких оснований беспокоиться о законе причинности. Причина и следствие никогда, ни в какой системе не могут поменяться местами.

Замедление времени в движущейся системе, о котором говорят преобразования Лоренца, в теории Эйнштейна уже не математическая фикция (измышление), позволяющая только объяснить неудачу опыта Майкельсона, а физическая реальность. Но можно ли это проверить на опыте?

Время на космическом корабле, летящем с постоянной скоростью, протекает медленнее, чем на «неподвижной» Земле. Но космонавт никоим образом не может подметить это изменение, так как и все процессы внутри корабля, которые могли бы служить мерилом времени, замедленны в том же отношении. Биение сердца и все функции организма тоже происходят в замедленном темпе. Отсюда делают заключение, что если скорость движения приближается к скорости света (не будем касаться технических трудностей, связанных с этим), то путешествие к далеким звездам не только нашей галактики, но и к другим, чужим галактикам теоретически осуществимо на протяжении человеческой жизни. Так, путешествие до туманности Андромеды займет 29 лет. Но по земным часам пройдет почти 3 миллиона лет.

Ряд парадоксальных следствий связан с подобным замедлением времени, но рассмотрение и разъяснение их не входит в задачу нашей беседы. Отсылаем читателя к литературе, указанной в конце беседы. Не раз скептики использовали эти парадоксы времени для того, чтобы подорвать саму теорию относительности. При этом главное возражение опиралось на отсутствие экспериментальной проверки. И вот в настоящее время эти возражения отпадают. Сейчас мы вам расскажем о том, как удалось проверить замедление времени на опыте.

Вы, конечно, слыхали о космических лучах? Это поток атомных ядер, в основном протонов, падающих на Землю из глубин мирового пространства. В земной атмосфере они сталкиваются с составляющими ее атомами и порождают вторичное излучение, в котором встречаются различные элементарные частицы. В данном случае нас будут интересовать частицы с массой, превосходящей массу электрона в 206,7 раза. Они получили название мю-мезонов. Мю-мезоны рождаются в самой атмосфере на разных ее высотах, и некоторые из них достигают поверхности Земли (в настоящее время их удалось получить искусственно при помощи мощных ускорителей).

Мю-мезоны не остаются на земле и не накапливаются в атмосфере, так как самопроизвольно распадаются с образованием трех элементарных частиц: электрона, нейтрино и антинейтрино (рис. 48). Средняя продолжительность жизни мю-мезона 2,2 микросекунды.

Для измерения продолжительности жизни мю-мезона применяется пластинка свинца, сверху и снизу которой расположены параллельные ряды трубок Гейгера (рис. 49). При прохождении пучка мю-мезонов через верхний ряд трубок последние отмечают это разрядными импульсами. Рожденные при распаде мю-мезонов электроны в свою очередь вызывают срабатывание нижнего ряда трубок при выходе из пластинки. Дело обстоит аналогично включению и гашению электрических ламп кнопочным выключателем: первый нажим — лампы загораются; второй нажим — гаснут. Промежуток времени между двумя рядами импульсов соответствует времени пребывания мю-мезона в свинце, затормаживающем движение мю-мезона до нуля, чем и заканчивается жизнь мю-мезона. Разрядные импульсы в первом ряду трубок включают, а во втором — выключают высокочастотный генератор. Число колебаний за время паузы в работе трубок (аналогия—времени горения лампы между двумя нажатиями кнопки) позволяет определить продолжительность распада заторможенного в свинце мю-мезона. Существуют и другие, более точные способы определения продолжительности распада. Статистическая обработка многих тысяч наблюдений позволяет рассчитать среднюю продолжительность жизни мю-мезона.

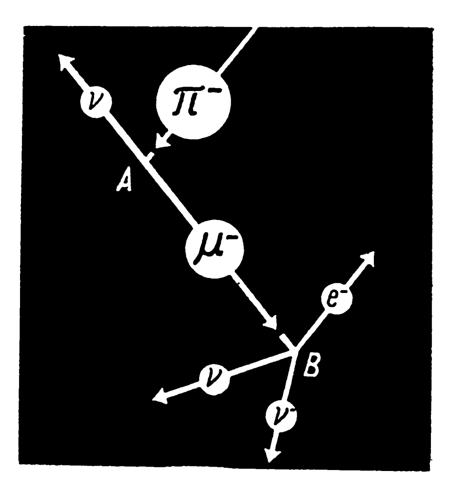


Рис. 48. Рождение и смерть мю-мезона.

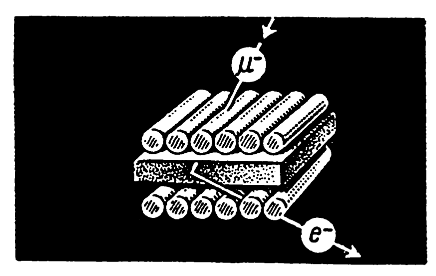


Рис. 49. Измерение продолжительности жизни мю-мезона.

Торможение мю-мезонов, влетающих в атмосферу почти со скоростью света, также приводит к их гибели. Тормозной путь мю-мезона легко подсчитать: $s = vt$, где $v \approx c = 3 \times 10^8$ *м/сек*.

Отсюда $s = 2{,}2 \cdot 10^{-6} \cdot 3 \cdot 10^8 \approx 660$ *м*.

Получается, что «жизненный путь» мю-мезона должен быть лишь немного больше половины километра. В действительности же мю-мезоны пролетают в атмосфере несколько километров. Очевидно, продолжительность их жизни с точки зрения земного наблюдателя увеличилась. Например, для мю-мезона, пролетевшего 15 *км*, по формуле замедления времени продолжительность жизни уже не 2,2 *мксек*, а 50 *мксек*!. Благодаря лоренцеву замедлению мю-мезон успевает дожить до прибытия на поверхность Земли (рис. 50).

Обращаем внимание читателя на то, что лоренцевы преобразования касаются как пространства, так и времени. Новое, что внес Эйнштейн, состоит в установлении реальной связи между пространством и временем, в то время как классическая механика разрывала эти два понятия и допускала существование не связанных между собой абсолютного пространства и абсолютного времени. Теперь осуществляются пророческие слова математика Миньковского: «Пространство само по себе и время само по себе погрузятся в реку забвения и останется жить лишь своеобразный их союз».

Поймите правильно: пространство и время — это формы существования материи. Без материи эти понятия, отдельно ли, вместе ли взятые, лишены всякого содержания. Теория относительности устанавливает тесную связь пространства и времени с движением материи и между собой. Но относительность пространства и времени нисколько не отрицает их объективности, т. е. независимости от нашего сознания и от наших методов измерений.

Поговорим теперь подробнее о втором постулате Эйнштейна— постулате постоянства скорости света. Принять этот постулат опять-таки затрудняет наша привычка или так называемый здравый смысл. Если сравнительно легко усваивается современными школьниками понятие относительности скоростей движения и относительности покоя, особенно когда учитель

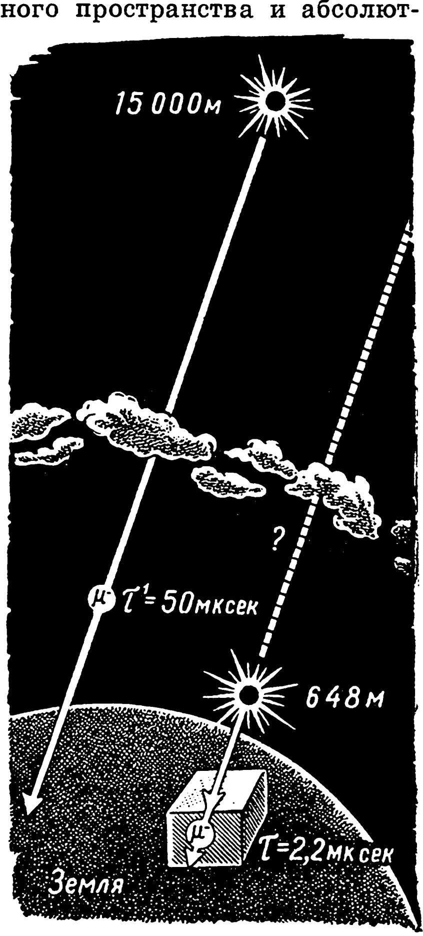



Рис. 50. Замедление времени для мю-мезона.

напомнит им знакомый каждому из жизни пример с двумя поездами, движущимися по параллельным путям, то понятие инвариантности скорости света (независимости от движения системы отсчета) сразу вызывает внутренний протест.

Если два поезда, из которых один имеет скорость $v_1 = 10 \frac{м}{сек}$, а другой $v_2 = 15 \frac{м}{сек}$, идут навстречу друг другу, то вы скажете, что относительно друг друга они движутся со скоростью

$$v = v_1 + v_2 = 25 \frac{м}{сек} \quad \text{(скорость обгона).}$$

Все это кажется вам абсолютно бесспорным. Но когда я скажу, что если две частицы нейтрино летят навстречу друг другу со скоростью света ($c$), то относительная скорость их сближения также равна $c$ (а не $2c$!), то вы, конечно, посмотрите на меня подозрительно и, быть может, усомнитесь в состоянии моего здоровья.

А все-таки это так! Выше написанные формулы сложения скоростей с учетом теории относительности имеют следующий вид:

$$\vec{v} = \frac{\vec{v}_1 + \vec{v}_2}{1 + \frac{v_1 v_2}{c_2}}.$$

Если скорости $v_1$ и $v_2$ малы по сравнению со скоростью света, то второе слагаемое в знаменателе представляет собой ничтожно малую дробь, которой можно пренебречь. Тогда и получится классическая (но приближенная) формула $\vec{v} = \vec{v}_1 + \vec{v}_2$.

Применим теперь релятивистскую формулу (релятивистскими — от французского relatif — относительный — называются формулы и законы теории относительности) к определению относительной скорости встречных нейтрино $v_1 = v_2 = c$.

$$v = \frac{c + c}{1 + \frac{c^2}{c^2}} = \frac{2c}{2} = c.$$

В связи с этим представляет интерес случай движения тела со скоростью $v_1$ навстречу свету. Применяя формулу релятивистского сложения скоростей $v_1$ и $c$, получим, что результирующая скорость (скорость сближения) оказывается всегда равной $c$, какова бы ни была скорость $v_1$:

$$v = \frac{v_1 + c}{1 + \frac{v_1 c}{c^2}} = \frac{v_1 + c}{1 + \frac{v_1}{c}} = \frac{(v_1 + c)\, c}{c + v_1} = c.$$

Но ведь иначе и быть не могло — дробь $\frac{v_1 + c}{1 + \frac{v_1 c}{c^2}}$ есть та же скорость $c$, лишь искусственно представленная в другом виде.

Скорость света, таким образом, является предельной, и ни одна скорость в природе не может быть больше скорости света.

Правда, это еще не следует из релятивистского закона сложения скоростей. Мы могли бы условно принять за предельную, скажем, скорость звука, если бы для сравнения одновременности двух событий воспользовались не световыми, а звуковыми сигналами и положили бы, что скорость звука ($b$) является постоянной величиной. Тогда результирующая скорость выразилась бы формулой:

$$\frac{v_1 + v_2}{1 + \frac{v_1 v_2}{b^2}},$$

где $b$ имело бы значение 330 *м/сек*.

Отступления от классического результата $\vec{v} = \vec{v}_1 + \vec{v}_2$ были бы заметны уже при сравнительно небольших скоростях $v_1$ и $v_2$. Например, два тела, движущиеся навстречу друг другу со скоростями $v_1 = v_2 = 100 \frac{м}{сек}$, сближались бы не со скоростью $v = v_1 + v_2 = 200 \frac{м}{сек}$, а со скоростью

$$v = \frac{200}{1 + \frac{200 \cdot 200}{330^2}} = \frac{200}{1 + 0{,}36} \approx 150 \frac{м}{сек}.$$

Но для звука существуют способы передавать сигналы быстрее звуковых. Заключение же о том, что никакое тело не может иметь скорость, большую скорости света, вытекает из рассмотрения других формул теории относительности. Так, по формуле лоренцева преобразования следует, что с увеличением скорости тела происходит сокращение его длины в направлении движения и при достижении телом скорости света длина сокращается до нуля.

Точно так же масса $m$ как мера инертности движущегося тела увеличивается по сравнению с массой покоя $m_0$ и при скорости $v$ равняется:

$$m = \frac{m_0}{\sqrt{1 - \left(\frac{v}{c}\right)^2}}.$$

Положив $v = c$, получим $m = \frac{m_0}{0} = \infty$. Таким образом, инертность бесконечно увеличивается, поэтому требуется бесконечное увеличение силы для сообщения ускорения и доведе-

ния скорости тела до скорости света, а тем более для ее превышения.

Предельный характер скорости света настолько противоречит привычным представлениям классической механики, что неоднократно вызывал возражения и, следовательно, сомнения в правильности теории относительности. Вот одно из таких возражений.

Представьте источник света, например прожектор маяка, вращающийся с угловой скоростью 200 $\frac{об}{сек}$, который бросает свет на 1000 *км*. Какой путь пробежит конец светового луча («зайчик») по небесному своду в секунду?

Конечно, $s = 2\pi rnt = 2 \cdot 3{,}14 \cdot 1000 \cdot 200 = 628\,000$ (*км*).

Значит, «зайчик» бежал вдвое быстрее света?!

В теории относительности, да и вообще в физике, когда говорят о скорости, то обычно имеют в виду скорость движения материального тела. А разве светлое пятно перемещалось по небесному своду как нечто материальное? Имеет оно массу? Требуется сила для сообщения ему ускорения?

А вот еще пример — вопрос для самостоятельного ответа читателя. Если считать, как это было когда-то общим убеждением, Землю неподвижной, то звезды должны за сутки описывать вокруг Земли окружности в десятки, сотни и тысячи световых лет. Как опровергнете вы противников теории относительности, приводящих это соображение в качестве доказательства возможности скоростей, больших скорости света? Простое заявление, что движение небесного свода — явление кажущееся, не будет принято вашими противниками за убедительное. Ведь вследствие симметрии мы вправе принять за тело отсчета и Землю, и далекие звезды.

В заключение о все еще не прекращающихся проектах фантастов, мечтающих о машине времени и возможности путешествий в прошедшее и будущее. Особенно возмущал Эйнштейна роман французского астронома Фламмариона «Люмен». Герой этого романа, Люмен, удаляется от Земли со скоростью 400 000 *км/сек*, т. е. большей скорости света. Догоняя световые волны, вышедшие когда-то с Земли, Люмен просматривает историю земных событий в обратном порядке — видит финал битвы при Ватерлоо, потом ее начало, а в промежутках снаряды влетают в жерла пушек, мертвые поднимаются и т. д.

«С относительностью времени, — говорил Эйнштейн, — все эти приключения и поставленные вверх ногами восприятия имеют не больше, а, пожалуй, даже меньше общего, чем рассуждения о том, что в зависимости от наших субъективных ощущений веселья и горя, удовольствия и скуки время кажется то короче, то длиннее. Здесь по крайней мере сами-то субъективные ощущения суть нечто реальное, чего нельзя сказать о Люмене, потому что его существование покоится на бессмысленной предпосылке — Люмену приписывается сверхсветовая скорость.

Но это не просто невозможное, но бессмысленное предположение, потому что теорией относительности доказано, что скорость света есть величина предельная. Как бы ни была велика ускоряющая сила и как бы долго она ни действовала, скорость никогда не может перейти за этот предел. Мы представляем Люмена обладающим органами восприятия, значит, телесным, но масса тела при световой скорости становится бесконечно большой, и всякая мысль о ее дальнейшем увеличении есть абсурд. Дозволительно оперировать мысленно с вещами, невозможными практически, т. е. такими, которые противоречат нашему повседневному опыту, но не с полнейшей бессмыслицей».

Для желающих подробнее ознакомиться с теорией относительности в самом популярном изложении рекомендуем прочесть следующие книги:

Л. Д. Ландау и Ю. Б. Румер. Что такое теория относительности. М., «Советская Россия», 1964.

Ю. И. Соколовский. Сюрпризы околосветовых скоростей. М., «Знание», 1963.

М. Гарднер. Теория относительности для миллионов. М., Атомиздат, 1965.

## МАССА ИНЕРТНАЯ И МАССА ТЯГОТЕЮЩАЯ

Все тела в пустоте падают с одинаковым ускорением. Но почему? Древний философ Аристотель, отрицавший саму возможность пустоты в природе, утверждал, что скорость (о законах ускорения Аристотель еще понятия не имел) пропорциональна силе и потому, чем тяжелее тело, тем быстрее оно падает. Следовательно, камень должен падать быстрее, чем пушинка. Однако в наши дни на уроке физики школьники могут видеть, что помещенные в трубку с откачанным при помощи насоса воздухом свинцовая дробинка и перышко падают одинаково быстро. Да и до изобретения воздушных насосов Галилей, роняя с высокой башни чугунное ядро и мушкетную пулю, показал, что они достигают земли одновременно. Вывести из этого опыта законы свободного падения тел во времена Галилея было невозможно, и потому Галилей изучал равномерно ускоренное движение на опытах со скатыванием шаров по наклонному желобу. Ведь движение по наклонной плоскости вызвано той же тяжестью, но ускорение скатывающегося шара меньше, чем при свободном падении, и движение становится легко наблюдаемым.

Однако экспериментально доказанная Галилеем одинаковость ускорения свободно падающих тел — это факт, но не объяснение. Ясным все же становилось одно: мы наблюдаем здесь действие двух противоположных причин — ускоряющее действие силы тяжести и какое-то тормозящее действие. Нью-

тон первый признал это тормозящее действие основным свойством материи и дал ему название «инерция». Чтобы выразить это свойство материи количественно, Ньютон ввел в механику термин «масса».

Свое знаменитое произведение «Математические начала натуральной философии» Ньютон начинает следующими словами: «Количество материи есть мера таковой, устанавливаемая пропорционально плотности и объему его». И дальше: «Это же «количество материи» я подразумеваю в дальнейшем под названием тело или масса».

Определению массы как количества материи (или, при небрежности языка, «количества вещества») ставят обычно упрек, видя в нем порочный круг. Говорят: в этом ньютоновом определении масса равна произведению плотности на объем, но ведь сама плотность есть отношение массы тела к его объему. Упрек этот несправедлив, так как Ньютон не давал определения плотности через массу, он считал понятие плотности первоначальным, не нуждающимся в определении.

Академик А. Н. Крылов поясняет, что порочного круга не получится, если плотностью называть отношение веса тела к весу равного объема воды. В таком случае отвлеченное число, являющееся мерой плотности, не будет зависеть ни от объема тела, ни от ускорения силы тяжести и будет для данного тела абсолютной, постоянной характеристикой.

Возражения против определения массы как количества материи идут и с другой стороны. Согласно теории относительности масса тела зависит от его скорости (подтверждено экспериментально на увеличении массы электронов, разгоняемых в современных ускорителях до скоростей, приближающихся к скорости света). Масса движущегося тела возрастает в отношении

$$1 : \sqrt{1 - \left(\frac{v}{c}\right)^2}$$

по сравнению с массой покоящегося тела. «Дефект массы», например, при синтезе гелия из водорода, аннигиляция («уничтожение») массы при соединении позитрона и электрона приводится обычно как довод, опровергающий ньютоново определение массы как количества материи.

Возражения эти были бы справедливы, если под материей подразумевать только вещество и забывать о ее другой форме — поле. Но при правильном применении закон сохранения массы останется во всех этих случаях в такой же мере непоколебленным, как и закон сохранения энергии (см. «Беседы по физике», ч. II, очерк «$E = mc^2$»).

В химии, где энергия, выделяемая при химических реакциях, мала по сравнению с огромной энергией, дремлющей в массе покоя реагирующих частиц, можно говорить о сохранении массы участвующих в реакции веществ до и после реакции, пре-

небрегая «дефектом массы» и подразумевая под массой количество вещества.

В тепловых расчетах мы тоже можем спокойно применять выражение «масса» в смысле количества вещества, так как в формуле $Q = cm(t_2 - t_1)$ нас не интересуют инертные или тяготеющие свойства массы $m$. Изменением массы от сообщаемой телу при нагревании энергии мы, конечно, тоже пренебрежем — масса чугунной гири при 0° С и при 100° С практически одна и та же.

В ядерных реакциях такое упрощение, конечно, не допустимо.

При всем том следует отчетливо понимать, что количество вещества не есть масса, но оно имеет массу. Смешение этих понятий представляет своеобразную небрежность живого языка. Нечто подобное встречаем мы и в других местах физики. Так, в электротехнике и радиотехнике распространен своего рода технический жаргон: говоря о какой-нибудь схеме радиоустановки, мы употребляем выражения «сопротивления», «емкости» вместо «проводники с таким-то сопротивлением» или «конденсаторы такой-то емкости». Так и вместо выражения 1 *кг* соли, если быть физически точным, следовало бы сказать «количество соли массой в 1 *кг*», но каким тяжеловесным стал бы тогда наш язык!

В применении к механике необходимо, однако, дать предельно четкое определение массы: масса — это свойство материи быть тяжелой и быть инертной. В отдельных случаях нас интересует первое из этих свойств, в других — второе. Поэтому для большей ясности говорят отдельно о массе тяжелой и массе инертной.

О количестве вещества (например, соли) мы судим по весу, который пропорционален тяжелой массе, но в то же время вес сообщает свободно падающему телу ускорение и здесь он будет пропорционален массе инертной.

Интуитивно на базе неосознанного опыта мы в жизни отождествляем понятия тяжелой и инертной массы, что и находит свое отражение в смешении понятий веса и массы («взвесьте мне полкилограмма сахару», «я с трудом оттолкнул тяжелую лодку от берега»). Инстинктивно и хозяйка, покупая на рынке курицу, проверяет не только ее тяжесть, как силу давления на руки, но и ее инертность, делая легкие движения руками вверх, как бы подбрасывая курицу.

Но не смешивайте, пожалуйста, тяжелую массу (употребительны также выражения «тяготеющая» или «гравитационная масса») с весом. Вес — это сила, с которой тело вследствие притяжения к Земле или другой планете давит на опору. На Луне вес тела в шесть раз меньше, чем на Земле. На полюсах вес тела больше, чем на экваторе (приблизительно на $^1/_{300}$ часть); при поднятии тела над земной поверхностью в одном каком-нибудь пункте вес становится все меньше и меньше, а тяготею-

щая масса тела во всех этих случаях не изменяется, так как она является характеристикой тела, а не его положения. Тяготеющая масса тела — это один из факторов, от которых зависит сила взаимного притяжения двух тел, что и выражено формулой закона всемирного тяготения:

$$F = \gamma \frac{mM}{r^2}.$$

Здесь $m$ — масса одного тела; $M$ — масса другого тела, а $r$ — расстояние между ними.

Инертная же масса (характеризует инертность тела), от которой зависит ускорение, получаемое телом под действием силы, входит в формулу второго закона Ньютона $F = ma$.

В применении к свободному падению под действием силы тяжести эта формула принимает вид: $P = mg$, где $P$ — вес, а $g$ — ускорение силы тяжести. Эту же формулу мы можем получить из формулы закона всемирного тяготения, придав ей вид $F = m \frac{M\gamma}{r^2}$ и положив $\frac{M\gamma}{r^2} = g$, где $g$ теперь будет характеристикой поля тяготения тела с массой $M$ (Земля, Луна) на расстоянии $r$ от центра масс.

Опыты Галилея над падающими телами с несомненностью показали, что гравитационная масса пропорциональна инертной массе тела. Во сколько раз масса чугунного ядра (точнее, инертная масса его) больше массы мушкетной пули, во столько раз больше и притяжение ядра к Земле, т. е. больше его гравитационная масса. Это положение имеет огромное значение для всей механики, и потому физики считали необходимым подтвердить его наиболее точными экспериментами.

Непосредственное наблюдение за падением тел такой точности не давало. Гораздо большую точность можно было получить, наблюдая качания маятников*.

Ньютон при помощи соответствующих опытов первый доказал пропорциональность массы и веса, или пропорциональность инертной и тяжелой масс. Вот описание опытов Ньютона:

«Я произвел такое испытание для золота, серебра, свинца, стекла, песка, обыкновенной поваренной соли, дерева, воды, пшеницы. Я выточил две круглые деревянные кадочки, равные между собой; одну из них я заполнил деревом, в другой я поместил такой же точно груз из золота (насколько мог, точно в центре качания) (рис. 51). Кадочки, подвешенные на равных нитях 11 футов длиной, образовали два маятника, совершенно одинаковых по весу, форме и сопротивлению воздуха; будучи помещены рядом, они при равных качаниях шли взад и вперед

---

* Период колебания маятника, как это видно из формулы $T = 2\pi \sqrt{\frac{l}{g}}$, не зависит от его массы, и потому маятники, изготовленные из различных материалов, должны колебаться с одинаковым периодом.

вместе в продолжение весьма долгого времени. Следовательно, количество вещества (масса) в золоте относилось к количеству вещества в дереве как действие движущей силы на все золото к ее действию на все дерево, т. е. как вес одного к весу другого. То же самое было и для прочих тел. Для тел одинакового веса разность количеств материи, т. е. масс, даже меньшая одной тысячной доли полной массы могла быть с ясностью обнаружена этими опытами».

Точность в 1/1000 казалась в то время вполне убедительной!

Через сто лет после Ньютона в 1830 г. астроном Бессель, повторяя опыты с маятниками, повысил точность опытов, подтверждавших пропорциональность тяжелой и инертной масс, до $10^{-5}$.

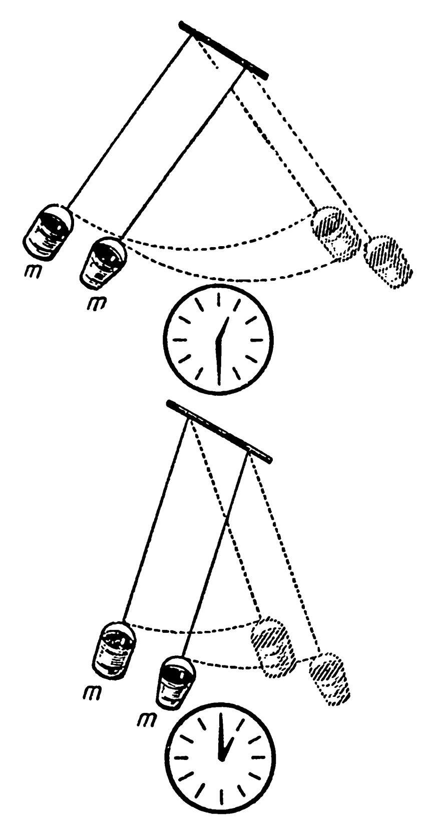


Рис. 51. Опыт Ньютона с кадочками.

До последнего времени рекордом точности экспериментов, проведенных с той же целью, считались эксперименты венгерского физика Этвеша, выполненные им в течение 1889—1908 гг. Приборы Этвеша позволили проверить постоянство отношения инертной и гравитационной масс с точностью до $5 \cdot 10^{-9}$ (т. е. до пяти миллиардных долей).

Прибор, которым пользовался Этвеш, представлял собой своего рода крутильные весы, с устройством и принципом действия которых школьники знакомятся на уроках физики в теме «Всемирное тяготение» (опыт Кавендиша) и в теме «Электростатика» (крутильные весы Кулона).

Этвеш сконструировал несколько приборов, получивших название гравитационных вариометров. На рисунке 52 показана принципиальная схема одного из основных типов приборов Этвеша, а рисунок 53 дает представление о внешнем виде и конструкции прибора.

Прибор представляет собой легкое коромысло, сделанное из алюминиевой трубочки длиной 40 *см*. На одном конце коромысла укреплен золотой цилиндрик массой 30 *г*, на другом поме-

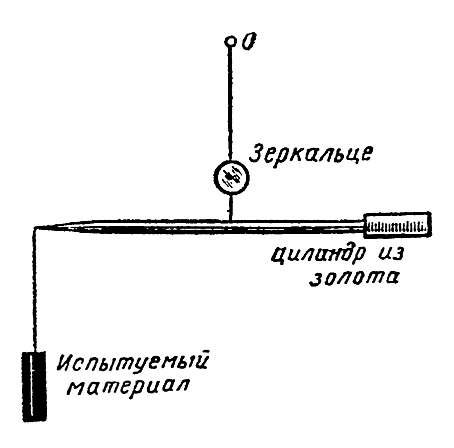



Рис. 52. Схема прибора Этвеша.

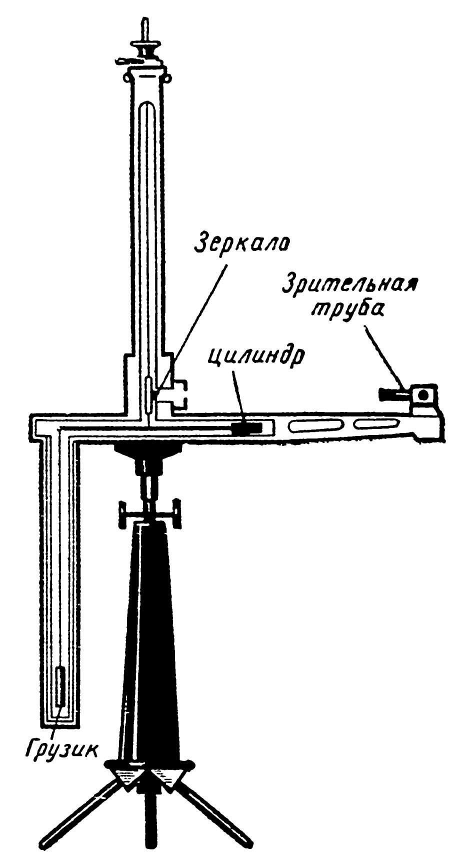



Рис. 53. Внешний вид и конструкция прибора Этвеша.

щается такой же массы грузик из испытуемого материала (платины, меди, дерева и др.).

Коромысло подвешено за середину при помощи тонкой платино-иридиевой проволоки. Прибор надежно защищен от влияния воздушных течений и температурных изменений. Наблюдатель к прибору не приближается, чтобы исключить возможность влияния его тела на прибор. Наблюдения проводятся автоматически при помощи движущейся фотографической ленты.

Коромысло находится в равновесии, если на оба конца его действуют равные, параллельные, одинаково направленные силы. Что это за силы? Это веса прикрепленных грузиков. Но чтобы разобраться во всем этом тонком опыте, постараемся уточнить, что следует понимать под термином «вес». Вопрос не так прост, как может показаться, и много досадных недоразумений возникает при отсутствии ясного понимания его. Итак, что такое вес? Весом называется сила, с которой тело под влиянием силы тяготения действует на какую-нибудь опору, удерживающую тело от падения*.

---

* В современных учебниках физики разграничивают три понятия: 1) силу тяготения, приложенную к телу и направленную к центру земного шара (определяется из закона всемирного тяготения); 2) силу тяжести — составляющую силы тяготения с учетом вращения Земли и 3) вес как силу давления, приложенную к опоре (горизонталь-

Только на полюсах вес совпадает по величине и направлению с силой притяжения тела к центру Земли. В любом другом месте на земном шаре вес тела $P$ будет представлять собой только одну из составляющих силы земного притяжения $G$. Другой составляющей будет центростремительная сила $F_ц$, величина которой зависит от инертной массы тела. Не будь этой составляющей, удерживающей тело на круговой траектории во время суточного вращения Земли вокруг оси, тело слетело бы вследствие инерции по касательной к поверхности, подобно тому как грязь слетает с вращающихся колес. Таким образом, в любой точке земной поверхности, кроме полюсов, вес тела ни по величине, ни по направлению не совпадает с силой тяготения (рис. 54). Угол φ, на который отклонилось направление веса от направления силы тяготения, зависит от широты местности: он равен нулю на полюсе и достигает максимума на широте 45°. В Будапеште, расположенном на широте 47°28′, угол φ соответствует 5′56″.

Если изменения силы тяжести для тел различной массы и центростремительная сила про-

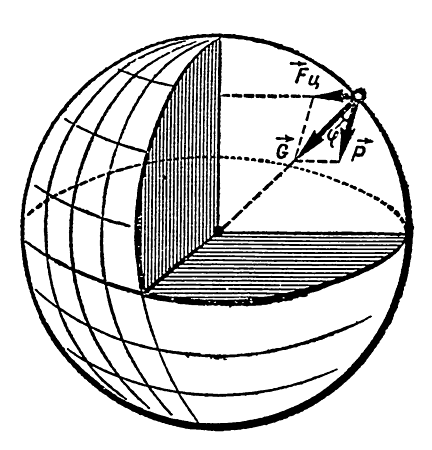
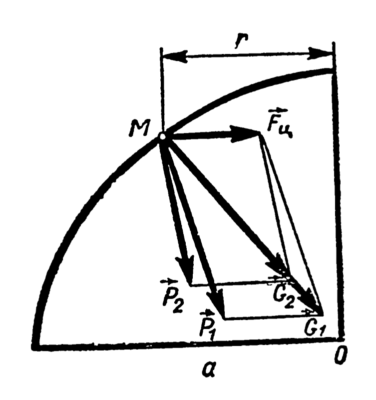


Рис. 54. Различие понятий силы тяжести и силы тяготения.



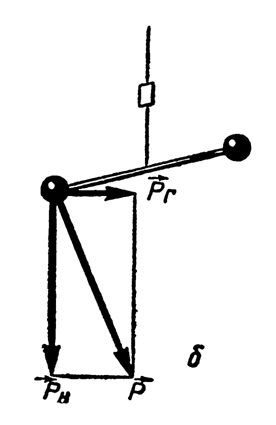



Рис. 55. К опытам Этвеша.

---

ной неподвижной площадке или вертикальному подвесу).

Вес в таком определении является силой упругости, вызванной деформацией тела, и, следовательно, должен быть отнесен к силам электромагнитной природы, тогда как сила тяготения и сила тяжести — силы гравитационные.

Логические и языковые трудности, возникающие при строгом следовании такому определению веса, заставляют нас в популярной книге воздержаться от него.

порциональны, то направление веса в данной точке земной поверхности будет для всех тел одинаково. В случае же отсутствия пропорциональности направление веса изменится.

Рисунок 55, *а* поясняет это: если бы два различных вещества равной массы (отмеренной на рычажных весах) притягивались с различной силой к Земле (силы $G_1$ и $G_2$), то при одинаковой составляющей $F_ц$ ($F_ц = \frac{mv^2}{R}$) вторые составляющие сил тяготения, т. е. веса $P_1$ и $P_2$, имели бы разные направления. Отклонения же веса $P$ от нормали $P_н$ вызвало бы появление горизонтальных сил $P_г$, действующих на коромысло и поворачивающих его (рис. 55, *б*). Упругая деформация проволоки, на которой подвешено коромысло, уравновесит это вращение, и коромысло остановится в каком-то положении. Более точно оценить угол закручивания помогает укрепленное на проволоке зеркальце, отбрасывающее направленный на него луч света в регистрирующий прибор.

Для достижения максимального эффекта коромысло устанавливают первоначально с запада на восток, перпендикулярно к меридиану. Сделав отсчет, поворачивают коромысло на 180° (следовательно, меняют испытуемый и контрольный грузики местами) и снова фиксируют положение светового зайчика.

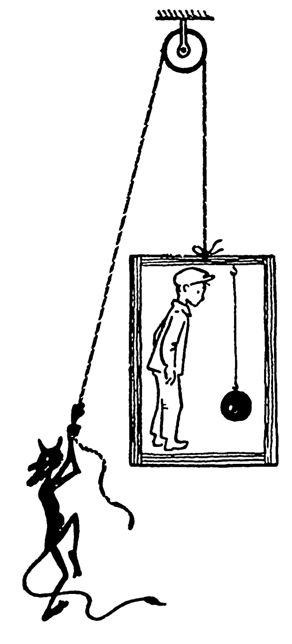


Рис. 56. Эффект ускоренного движения воспринимается наблюдателем в ускоряемой системе как эффект поля тяготения.

Опыт повторялся множество раз, однако Этвешу не удалось подметить смещения больше чем на 1/60 000 долю секунды дуги, что соответствует точности в миллиардные доли.

Последние измерения американского физика Дике (1961 г.) позволили повысить точность опыта Этвеша еще в 50 раз. Конструкция прибора американского физика несколько отличается от прибора Этвеша, так как позволяет учитывать не только притяжение к Земле, но и к Солнцу. Опыт Дике проводился со свинцом и медью. С точностью до $10^{-10}$ можно утверждать, что гравитационные ускорения свинца и меди одинаковы.

Однако все рассмотренные эксперименты, устанавливая факт постоянства ускорения силы тяжести, все же не дают ответа на вопросы, почему все тела падают с одинаковым ускорением, какой физический смысл скрывается в факте пропорциональности (равенстве) инертной и тяготеющей масс. Зачем введены два понятия вместо одного и что же в конце концов представляет собой масса?

Ответ на эти вопросы дает общая теория относительности Эйнштейна (1915 г.). Не пользуясь математическим аппаратом этой теории, мы ограничимся только ее выводами в отношении вопросов, затронутых в данной беседе.

Прежде всего предоставим слово самому Эйнштейну. Говоря о равенстве инертной и тяжелой массы, он описывает воображаемый эксперимент в пространстве вне Земли.

«Представим себе в качестве исходного тела просторный ящик на манер комнаты. Внутри находится наблюдатель, снабженный надлежащими аппаратами.

В середине крышки ящика с наружной стороны вделан крюк с привязанным к нему канатом. И вот некоторое существо, безразлично какое (рис. 56), тянет за этот канат с постоянной силой. Тогда ящик вместе с наблюдателем начнет лететь «вверх» в равномерно ускоренном полете. С течением времени его скорость возрастает до фантастических размеров, если судить обо всем этом с другого исходного тела, которое никто не тащит вверх.

Как представляется все событие человеку в ящике? Ускорение ящика переносится на него путем давления от пола ящика. Поэтому он должен принять это давление, упираясь ногами в пол. В своем ящике он тогда стоит совершенно так же, как любой из нас в комнате какого-либо дома на Земле. Если он выпускает из рук какой-нибудь предмет, то на последний уже не передается ускорение ящика, и он поэтому будет приближаться к полу ящика в равномерно ускоренном относительном движении. Дальше наблюдатель убедится, что ускорение тел к полу всегда будет сохранять одну и ту же величину, с какими бы телами он ни проделывал свой опыт, и он придет к выводу, что он со своим ящиком находится в некотором неизменном во времени поле тяготения.

Надо обратить особое внимание на то, что возможность такого истолкования покоится на фундаментальном свойстве поля тяготения сообщать всем телам одинаковое ускорение, или, что то же самое, на равенстве инертной и тяжелой массы.

На внутренней стороне крышки ящика наш наблюдатель укрепляет веревку и к свободному концу ее подвязывает какой-либо предмет. Подвязанный предмет заставит веревку повиснуть «вертикально» в натянутом состоянии. Где причина этого натянутого состояния? Человек в ящике скажет: «На подвешенное тело действует в поле тяготения сила, влекущая его вниз и уравновешиваемая напряжением веревки. Величину напряжения определяет тяжелая масса подвешенного тела».

Напротив, наблюдатель, свободно парящий в пространстве (вне ящика), рассудит так: «Ускоренное движение ящика увлекает за собой веревку, а последняя тянет за собой в этом движении подвешенный к ней предмет. Напряжение веревки должно быть настолько велико, чтобы могло вызвать ускоренное

движение предмета. Величину напряжения определяет инерционная масса тела».

На этом примере мы видим, что при нашем расширении принципа относительности (на движение с ускорением) из него с необходимостью вытекает положение о равенстве инертной и тяжелой массы. Этим достигается физическое истолкование названного закона».

Из приведенного примера видно, что мы никогда не можем сказать, что является причиной ускорения тел в системе: ускорение самой системы или сила тяготения? Эйнштейн назвал это «принципом эквивалентности».

Впрочем, это справедливо лишь для небольшого (вернее, бесконечно малого) объема пространства, в котором не наблюдается неравномерности поля тяготения. Чтобы понять это, рассмотрим предыдущий опыт с ящиком, только размеры ящика пусть будут достаточно велики. Различия между силами, обусловленными инерцией (короче, силами инерции), и силами тяготения тогда становятся очевидными: отвесы в кабине, движущейся с ускорением, параллельны друг другу, тогда как направления отвесов в поле тяготения для покоящейся кабины пересекаются в центре Земли (рис. 57).

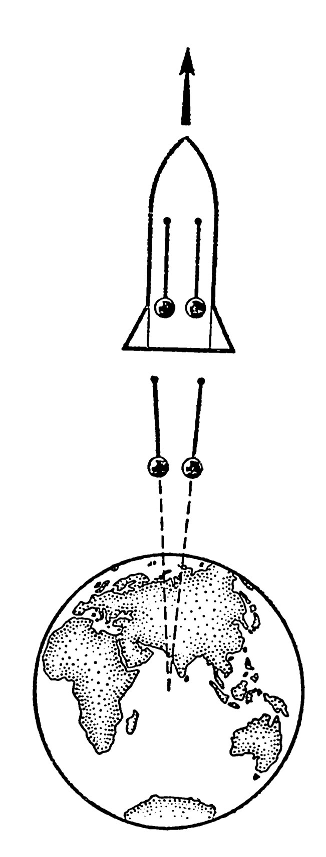


Рис. 57. Отвесы в кабине, движущейся ускоренно, и отвесы в поле тяготения.

Чтобы устранить такое расхождение с принципом эквивалентности, Эйнштейн делает следующий смелый шаг: подвергает пересмотру наше обычное представление о пространстве. Эйнштейн полагает, что если различные тела получают, как в этом убеждает эксперимент, одинаковые ускорения силы тяжести, то это можно скорее считать характерной особенностью самого физического пространства, чем характеристикой веществ, из которых состоят тела.

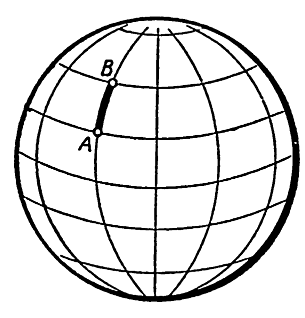



Рис. 58. На сфере дуга большого круга есть кратчайшее расстояние между двумя точками.

Наши привычные представления о пространстве хорошо описываются геометрией, которую изучают в средней

школе, геометрией, созданной гениальным древнегреческим математиком Евклидом. Мы настолько свыклись с этой геометрией, что нам трудно представить иные соотношения, чем те, которые установлены в геометрии Евклида: «Между двумя точками можно провести только одну прямую линию», «Прямая есть кратчайшее расстояние между двумя точками», «Через точку, взятую вне прямой, можно провести только одну прямую, параллельную данной», «Сумма внутренних углов треугольника равна двум прямым углам». Все эти истины бесспорны на плоскости. Но если попробовать применить их, например, к сферической поверхности, то все окажется по-другому. Кратчайшее расстояние между двумя точками на поверхности земного шара есть дуга большого круга, т. е. круга, плоскость которого проходит через две данные точки и центр шара (например, дуга меридиана, рис. 58). Обитатели Земли склонны принимать меридиан за прямую, идущую с севера на юг через данную точку. Вы можете провести у себя на дворе меридиан, если воткнете в землю вертикально шест и провесите линию, по которой будет падать тень в истинный полдень. Через два полюса Земли, однако, можно провести бесчисленное количество меридианов.

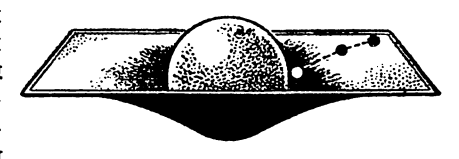


Рис. 59. Искривление пространства.

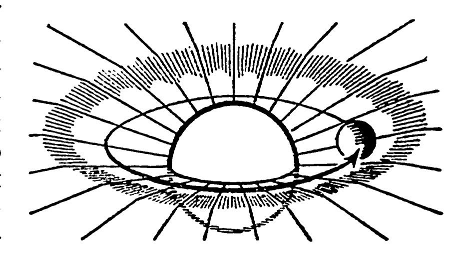


Рис. 60. Причина тяготения — искривление пространства.

Сумма углов треугольника, соединяющего три точки на земной поверхности, уже не равна, а больше $2d$. Знаменитый математик XIX века Гаусс, опасаясь насмешек, тайком пытался определить эту сумму углов в треугольнике между тремя горами — она оказалась больше $2d$.

Геометрия мира, в котором мы живем, не является геометрией Евклида, или, образно выражаясь, наше пространство «искривлено».

Кратчайшее расстояние между двумя точками в таком пространстве называется геодезической линией. Искривление пространства вызвано наличием в нем материальных тел, говорит Эйнштейн, повторяя тем самым тезис австрийского физика Маха («принцип Маха»). Присутствие массивных тел, например Солнца или Земли, искривляет пространство таким образом, что геодезическими линиями, или кратчайшими путями, являются естественные орбиты и траектории движущихся тел.

Взгляните на рисунок 59. Уступая потребности человека в наглядном образе для нового понятия, художник изобразил

«искривление пространства», как прогибание упругой резиновой пленки, на которую положен апельсин. Тогда маленькие тяжелые шарики (планеты), если их покатить по образовавшейся искривленной поверхности, станут описывать свои геодезические орбиты вокруг центрального тела (рис. 60.)

Центральное тело (Солнце) не притягивает планеты, оно только искривляет пространство. Эллипсы, по которым согласно законам Кеплера движутся планеты, — это лишь наиболее «прямые», а не окольные пути для движения планет в пространс ве и времени. Да, и времени тоже, так как геометрия нашего мира не трехмерная, а четырехмерная. Четвертым измерением является время.

Математические исследования движения тел по геодезическим линиям четырехмерного пространства показывают, что время, затрачиваемое на прохождение пути по геодезической линии, оказывается наибольшим (!) по сравнению с движением по другим возможным траекториям.

Инерция, таким образом, есть не что иное, как свойство тел двигаться по наиболее «прямому» (не в евклидовом смысле «прямому») и притом не более скорому пути.

Не сетуйте, читатель, на естественную неясность для вас терминологии — в краткой беседе мы не можем ничем иным помочь вам, кроме как советом обратиться к более подробным книгам, хотя бы популярно излагающим основные понятия теории относительности. Наша цель более скромная: мы хотели ответить лишь на один вопрос: почему тела в пустоте падают с одинаковым ускорением? Суммируя все сказанное выше, мы можем представить наш ответ в виде следующих последовательных положений:

1. Тела падают с одинаковым ускорением, потому что тяжелая масса пропорциональна (равна) массе инертной.

2. Силы инерции эквивалентны силам тяготения.

3. Вследствие инерции тела движутся по наиболее «прямым» (геодезическим) линиям.

4. Силы инерции (силы тяготения) вызваны наличием материальных тел, искривляющих пространство.

К этому остается добавить, что теория относительности не только устраняет различие между двумя различными массами (инертной и тяжелой), но и связывает понятие массы с понятием энергии.

В свое время («Беседы по физике», II часть) мы рассказали об этой связи, выражаемой формулой $E = mc^2$.

С этой формулой знакомятся учащиеся и в школьном курсе физики.

Эйнштейн показал, что всякий физический объект, обладая энергией, обладает и массой. Эта взаимная связь энергии и массы относится к величайшим обобщениям современной физики.

# ЭФФЕКТ МЕССБАУЭРА

## (ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ ПРОВЕРКА ОБЩЕЙ ТЕОРИИ ОТНОСИТЕЛЬНОСТИ)

Удивительно, как в современной физике переплетаются ее, казалось бы, весьма удаленные области! Законы динамики, резонанс, принцип Допплера, фотолюминесценция, спектральный анализ, радиоактивный распад, испускание и поглощение атомным ядром гамма-квантов — вот ряд вопросов, которыми мы должны сейчас заняться, прежде чем можно будет приступить к описанию одного из наиболее сенсационных открытий последних пятнадцати лет—эффекта Мессбауэра, позволившего с изумительной, небывалой еще точностью проверить принцип эквивалентности Эйнштейна (см. предыдущую беседу «Масса инертная и масса тяготеющая»).

Но кто же такой Мессбауэр и в чем ценность его открытия? Рудольф Мессбауэр — молодой немецкий физик, открывший в 1958 г. в процессе подготовки докторской диссертации никому до тех пор незнакомое явление, которому вскоре было дано название «эффект Мессбауэра».

Первоначальной целью Мессбауэра было измерить продолжительность жизни («полупериод распада») атома радиоактивного изотопа иридия $^{191}_{77}\text{Ir}$ в возбужденном состоянии в связи с попыткой построить идеальный хронометр. При этом он натолкнулся на не известное никому явление, связанное с резонансным испусканием и поглощением $\gamma$-лучей, и дал ему физическое истолкование.

Открытие 29-летнего ученого, первоначально почти не обратившее на себя внимание физиков, вскоре выросло в настоящую научную сенсацию. Физики увидели, что в эффекте Мессбауэра они получили в руки новый исключительной точности метод исследования, который может быть практически использован в разнообразных областях физики.

В 1962 г. Мессбауэру за его открытие была присуждена Нобелевская премия.

Целью настоящей беседы и является популярное изложение сущности эффекта Мессбауэра. Но для понимания этого нового метода нам еще не хватает знаний, и потому предварительно рассмотрим некоторые вопросы физики или не входящие в школьный курс, или освещаемые в нем с других позиций.

**1. В поисках идеального измерителя времени (хронометра).** Существующие механические хронометры не удовлетворяют всем условиям, которым должен отвечать идеальный хронометр. Ход этих хронометров определяется маятником. Если изменится длина маятника, хотя бы от изменения температуры, то изменится период его колебания, а значит, часы начнут отставать или спешить. Но, оказывается, сама природа создала идеальный, не зависящий от изменения внешних условий хронометр в виде ядра атома.

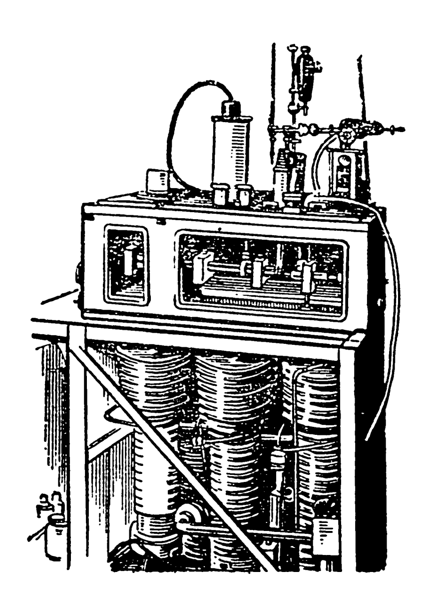


Рис. 61. Общий вид атомных часов.

Заманчивая идея построить «атомные часы»! Первые «атомные», вернее молекулярные, часы были построены в 1955 г. Чарлзом Таунзом (США). В них нет ни маятника, ни механизма зубчатых колес. Роль маятника, регулирующего ход часов, играют колебания молекул аммиака. В свою очередь колебания молекул возбуждаются и поддерживаются высокочастотным кварцевым радиогенератором. Спиральная трубка-волновод, заполненная аммиачным газом, принимает микроволновые колебания генератора и передает приемному устройству, приводящему в движение синхронный мотор, вращающий стрелки часов. Колебания электромагнитных волн в волноводе возбуждают колебания молекул аммиака. Возбуждение молекул оказывается наибольшим при совпадении частоты собственных колебаний молекул с колебаниями переменного тока, вырабатываемого генератором. В случае малейшего расхождения частот специальный прибор — дискриминатор отмечает это и через блок, вырабатывающий «сигнал погрешности», вызывает необходимое повышение или понижение частоты генератора. Довольно сложное устройство атомных часов видно из рисунка 61.

Так как молекулы аммиака своих свойств не меняют, то их колебания являются надежным средством контроля и регулирования постоянства хода часов. Такие часы должны «идти» с точностью до миллионных долей секунды. Практически достигнутые результаты поразительны: за 300 лет часы уйдут или отстанут только на одну секунду! Вскоре после этих часов были построены

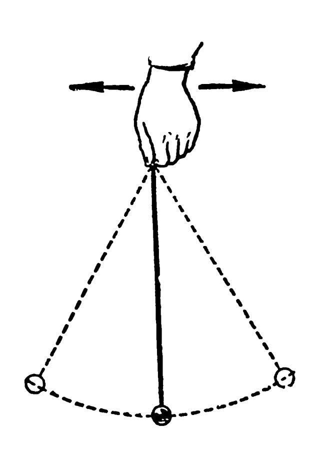


Рис. 62. Если частота вынужденных колебаний совпадает с частотой собственных колебаний маятника, то наблюдается резонанс.

атомные часы, обеспечивающие измерение времени с погрешностью в 1 *сек* за 1000 лет.

Еще большую точность удалось достичь, используя колебания атомов цезия. Работы по дальнейшему повышению точности измерения времени продолжаются и у нас и за рубежом. В процессе подобного рода работы Мессбауер и натолкнулся на явление, которое привело его к поразительному открытию.

**2. Явление резонанса.** Как известно, явление резонанса, наблюдаемое на вынужденных колебаниях, выражается в резком увеличении амплитуды колеблющегося тела, когда частота вынужденных колебаний совпадает с частотой собственных колебаний тела.

Подвесьте на нитке шарик, держа нитку за свободный конец рукой (рис. 62). Перед вами простейший нитяной маятник. Период собственных колебаний маятника, если его пустить колебаться в поле тяготения, зависит только от длины маятника $l$:

$$T = 2\pi \sqrt{\frac{l}{g}},$$

где $g$ — ускорение силы тяжести в данном месте.

Начните теперь делать периодические движения рукой взад и вперед в плоскости качания маятника. Тогда колебания руки будут передаваться через нить маятнику и сообщать ему дополнительные, вынужденные колебания. При слишком большой частоте колебаний руки маятник будет только вздрагивать, слегка отклоняясь от положения равновесия. Но если вам удастся осуществить такое движение руки, что частота колебаний руки будет совпадать с частотой собственных колебаний маятника, то амплитуды колебаний маятника станут возрастать и могут стать очень большими.

Кому не приходилось раскачивать качели? Как это надо делать? Необходимо подталкивать качели в такт, т. е. когда качели, закончив одно колебание, только еще начинают второе. Тогда даже слабыми толчками можно их сильно раскачать.

То, что справедливо для механических колебаний, справедливо и для всяких других: акустических (резонанс камертонов, настроенных в унисон), оптических (спектры поглощения) и т. д.

Рассмотрим оптический резонанс. Из курса физики известно, что спектр Солнца представляет собой сплошной спектр, но перерезанный многочисленными тонкими темными линиями, называемыми линиями поглощения или фраунгоферовыми линиями. Образование фраунгоферовых линий объясняется тем, что свет от Солнца прошел через атмосферу Солнца и при этом часть энергии поглотилась (израсходовалась на сообщение колебательных движений атомам тех веществ, которые находятся в атмосфере Солнца). Линии поглощения не вполне черные; они кажутся таковыми по сравнению с более яркими соседними участками спектра. Если бы удалось закрыть эти яркие области, то мы увидели бы собственный цвет данной линии, соот-

ветствующий определенной длине волны или частоте. Темные фраунгоферовы линии вспыхивают соответствующими цветами во время полного солнечного затмения, когда яркий солнечный диск закрыт Луной и мы наблюдаем спектр раскаленной газовой оболочки Солнца (обращенный спектр). Открытие обращения спектральных линий привело к формулировке закона Кирхгофа: всякое тело поглощает те лучи, которые само испускает. К этому выводу Кирхгоф пришел во время совместной работы с Бунзеном в 1859 г. Вот описание некоторых опытов Кирхгофа: «Я взял очень слабый солнечный спектр и поместил перед щелью прибора (спектроскопа) пламя натрия. Я увидел, что темная фраунгоферова линия *D* превратилась в светлую. Затем я пропустил через пламя натрия яркий солнечный луч и увидел, что темная линия *D* вспыхнула с необыкновенной силой. Я заменил солнечный луч друмондовым светом (так называется ослепительно яркий свет, испускаемый куском мела или извести, раскаленным в пламени водородной горелки. — *М. Б.*), спектр которого, как спектр всякого раскаленного твердого или жидкого тела, не имеет темных линий (сплошной спектр). Если свет этого источника проходил через натриево пламя, то вместо линии натрия *D* появлялась темная полоса». Эти наблюдения, продолжает Кирхгоф, «приводят к неожиданному заключению о происхождении фраунгоферовых линий и дают возможность судить о материальном составе Солнца, а может быть, и наиболее светлых далеких звезд».

Вскоре после опубликования сообщения Кирхгофа стало появляться множество работ других известных физиков, в которых обращалось внимание на сходство оптических и акустических явлений. Уже в 1860 г. Стокс назвал закон Кирхгофа «оптическим резонансом».

Обратимся теперь к явлениям излучения и поглощения в атомной и ядерной физике.

Физика XX века объяснила излучение и поглощение на основе теории атомных энергетических уровней. Общеизвестна следующая модель строения атома по Резерфорду (1911 г.): атом состоит из положительно заряженного ядра, вокруг которого обращаются электроны. Число электронов и радиусы их орбит различны у различных атомов. В 1913 г. Нильс Бор высказал положения, известные под названием постулатов Бора:

1) Для каждого атома возможными являются не любые орбиты электронов, а только некоторые.

2) Каждому атому свойственно поглощать и отдавать энергию определенными порциями, равными разности его уровней энергии. Самый низкий из возможных уровней энергии для электрона в атоме соответствует его «основному», или «нормальному», состоянию. Находясь на этом энергетическом уровне (по Бору, на этой орбите), электрон может неограниченно долго обращаться вокруг ядра, не теряя и не приобретая энергии. Приток энергии извне переводит атом в «возбужденное»

состояние — это соответствует перескоку электрона на какую-нибудь более удаленную орбиту (на высший энергетический уровень).

Условно за нуль энергии принимают энергию свободного (т. е. находящегося вне атома) покоящегося электрона. Следовательно, электрон, вращающийся на орбите, должен обладать отрицательной энергией. Ведь только сообщение ему некоторого дополнительного количества энергии может сделать его свободным, т. е. таким, каким мы его знаем в случае электрического заряда на проводнике. По выражению современного физика Дирака, только сообщение электрону дополнительной энергии переводит его из области отрицательной энергии в область положительной и делает его «респектабельным» (*респектабельный* — достойный уважения).

В возбужденном состоянии атом может находиться лишь ничтожные (миллиардные) доли секунды. Находясь как бы в состоянии неустойчивого равновесия, электрон соскакивает на свой основной уровень, излучая при этом избыток энергии в виде электромагнитных волн. Так как каждый атом обладает несколькими уровнями энергии, то возможны различные, для каждого атома определенные порции излучаемой и поглощаемой энергии. Тем самым теория Бора объясняет образование как спектров испускания, состоящих из нескольких определенных для атома данного элемента цветных линий, так и спектров поглощения с соответствующими темными линиями.

Если бы для электрона в атоме были возможны любые орбиты, то и излучения энергии могли бы быть любыми и вместо линейчатого спектра испускания всякий элемент давал бы сплошной спектр.

Из приведенного объяснения видно, что образование спектров поглощения представляет собой опять явление резонанса.

И в ядерной физике мы встречаемся с явлением резонанса. Именно в области ядерного резонанса работал Мессбауер.

С явлением, аналогичным ядерному резонансу, физики встретились еще задолго до того, как было установлено само понятие об атомном ядре. Еще в XIX столетии интерес физиков вызвало явление, получившее название флюоресценции, состоящее в том, что некоторые вещества после освещения ярким светом сами приобретают способность кратковременного свечения после прекращения внешнего освещения. К таким веществам относится и природный минерал плавиковый шпат, от латинского названия которого «флюорит» Стокс образовал слово «флюоресценция». Более современный термин для обозначения того же явления — фотолюминесценция. Исследуя спектральный состав свечения, Стокс установил закон, или правило, носящий его имя: спектральные линии люминесцирующих веществ оказываются смещенными в красную сторону спектра, т. е. в область лучей с меньшей энергией. Правило Стокса было объяснено лишь современной квантовой физикой.

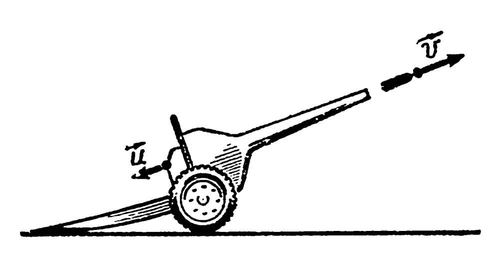


Рис. 63. Явление отдачи.

Само же явление флюоресценции атомная физика объясняет излучением фотонов электронами атома при возвращении их с возбужденного уровня энергии на основной.

Атомы особенно интенсивно поглощают свет частоты, соответствующей переходу из основного в ближайшее возбужденное состояние. Отсюда название «резонансное поглощение». Явление резонансного поглощения наблюдается и в ядерной физике.

Согласно современному учению ядра атомов также имеют различные уровни энергии. Сообщение энергии извне приводит ядро в возбужденное состояние. Возбужденное ядро находится в колебательном состоянии, и, когда колебания достигают достаточной интенсивности, ядро выбрасывает квант энергии. Энергия излученного кванта меньше энергии, поглощенной ядром при возбуждении. Уменьшение энергии излученного кванта по сравнению с энергией поглощенного кванта аналогично явлению отдачи при выстреле из ружья или пушки (рис. 63). Мессбауер открыл способ, как можно устранить отдачу при излучении кванта. Ясно, что в таком случае энергия излученного кванта будет больше.

**3. Принцип Допплера.** В 1842 г. профессор математики в Праге Допплер высказал мысль, что ощущения звука и цвета должны зависеть не только от длины волны, но и от движения наблюдателя или источника колебательных процессов, вызывающих эти ощущения. Этой гипотезой он хотел объяснить окраску звезд. В своем сочинении «О цвете двойных звезд» Допплер утверждал, что звезды, движущиеся в направлении к наблюдателю или удаляющиеся от него, должны казаться цветными, хотя сами по себе они белого цвета. Это происходит по следующей причине: при движении наблюдателя к звезде или звезды к наблюдателю глаз наблюдателя будет улавливать большее число волн, чем при постоянном расстоянии между звездой и наблюдателем. Следовательно, частота воспринимаемых волн будет увеличиваться, а с нею будет происходить изменение цветности: желтый цвет будет переходить в зеленый, голубой, фиолетовый. Эта теория встретила возражения. Ее противники считали, что при чрезвычайно большой скорости света относительная скорость звезд и Земли слишком незначительна, чтобы изменить белый цвет звезды в цветной. Проверить теорию на опыте в то время не было возможности; смещение цветов было обнаружено только после открытия спектрального анализа.

Что касается звука, то проверить теорию Допплера было легко и в земных условиях. Подобная проверка была проведена




Рис. 64. Принцип Допплера для движущегося наблюдателя.

на таком опыте. Около полотна железной дороги становился трубач, трубивший одну и ту же ноту, а ехавшие на паровозе музыканты (люди с утонченным слухом) отмечали высоту тона при приближении и при удалении от источника звука. Эксперимент проводился потом в обратном порядке: источник звука на паровозе — наблюдатели на станции. В том и другом случае подтвердилось, что при относительном сближении наблюдателя и источника тон повышается, а при удалении понижается. Изменение высоты тона связано с изменением частоты; в случае движущегося наблюдателя и неподвижного источника (I вариант опыта) новая частота

$$\nu' = \nu_0\left(1 \pm \frac{u}{c}\right),$$

где $u$ — скорость наблюдателя относительно источника, а $c$ — скорость звука в воздухе. При движении наблюдателя навстречу источнику (рис. 64) число волн, достигающих уха в секунду (частота) увеличивается, поэтому формулу надо брать со знаком «+»; при удалении частота уменьшается, меньше волн успеет догнать удаляющееся ухо, — в формуле будет стоять знак «—».

А как проводить расчет, если источник звука движется, а наблюдатель неподвижен? Казалось бы, что расчет должен оставаться прежним, ведь $u$ — относительная скорость, однако это не так. При неподвижном источнике длина волны была вели-

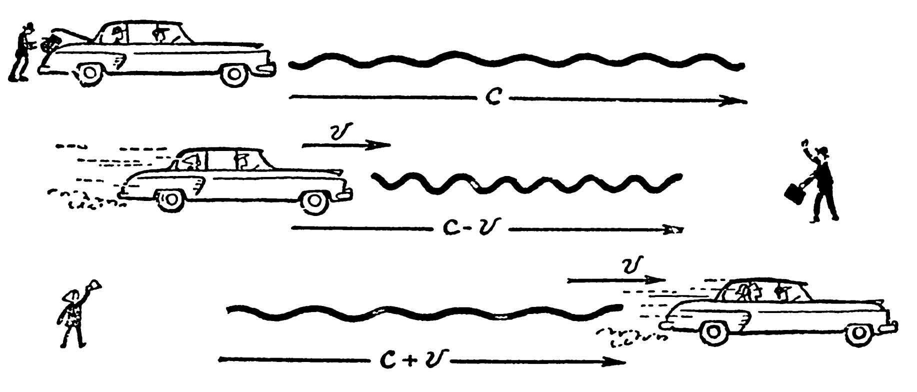



Рис. 65. Принцип Допплера для движущегося источника.

чиной постоянной, менялось лишь воспринимаемое число волн. Если же источник движется к наблюдателю, то длина волны должна уменьшаться, — источник нагоняет свои волны (рис. 65). При движении источника от наблюдателя длина волны растягивается. Следовательно, для волн укороченных частота

$$\nu' = \frac{c}{\lambda'} = \nu_0 \frac{c}{c-u} = \frac{\nu_0}{1-\frac{u}{c}},$$

а для волн растянутых

$$\nu' = \frac{\nu_0}{1+\frac{u}{c}}.$$

Объединяя обе формулы, получим:

$$\nu' = \frac{\nu_0}{1 \pm \frac{u}{c}};$$

знак «—» ставится в случае приближения источника, знак «+»— при его удалении. Для световых волн, которые представляют собой электромагнитные волны, материальные сами по себе, а не колебания среды, как это имеет место для звуковых волн, длина волны не изменяется, а изменяется относительная частота по формуле

$$\nu' = \nu_0 \left(1 \pm \frac{u}{c}\right),$$

где $c$ — скорость света.

Изменение частоты в этом случае мы воспринимаем как смещение спектральных линий (независимо от того, кто движется): при удалении источника от наблюдателя смещение происходит в сторону красного цвета, а при приближении — в сторону фиолетового. Особенную известность получило «красное смещение». Оно наблюдается в действительности и имеет большое значение в астрономии и ядерной физике. Непосредственно связано оно и с эффектом Мессбауера.

**4. Красное** смещение. Термин «красное смещение» употребляется в двух значениях: 1) допплеровское смещение и 2) гравитационное смещение. В первом значении этот термин применяется в отношении метагалактики, т. е. предполагаемого гигантского скопления галактик, находящихся за пределами нашей галактики. Мы живем в системе Млечного Пути. Лишь наиболее близкие и наиболее яркие из его звезд мы видим на звездном небе невооруженным глазом. Телескоп открывает множество недоступных глазу звезд, а в сочетании с фотопластинкой еще больше.

За пределами огромного количества звезд, принадлежащих к нашей галактике, в бездонных далях пространства мерцают иные миры, иные галактики. Вот на них и было обнаружено это

удивительное явление «красного смещения». Спектральные линии известных на Земле элементов оказались сдвинутыми в красную область спектра. Разумеется, это связано с изменением частоты световых волн и, согласно принципу Допплера, свидетельствует о том, что далекие галактики удаляются от нас, разбегаются во всех направлениях. Это привело астрономов к теории расширяющейся Вселенной или хотя бы ее части, доступной нашему исследованию. Другого объяснения нет. В нашу задачу не входит рассуждать о том, есть ли это лишь определенный этап в жизни Вселенной и не последует ли за ним период сжатия (теория пульсирующей Вселенной) или это расширение будет продолжаться и далее, а убыль вещества, вызванная таким разбеганием звезд, в доступной нам области Вселенной, постоянно восполняется за счет каких-либо процессов. Бесспорно одно: тенденция к расширению есть общепризнанный в науке факт. По наблюдению смещения можно определить и скорость удаления галактик.

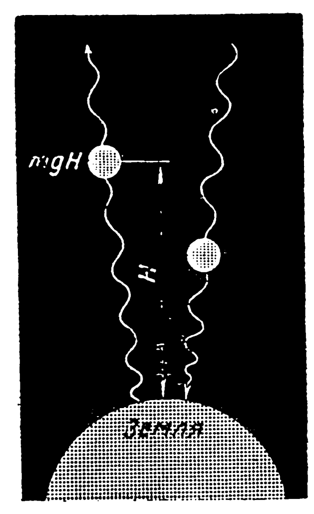


Рис. 66. Гравитационное красное смещение.

Гравитационное красное смещение — это уменьшение частоты световой волны при движении против сил тяготения. В преувеличенном виде оно показано на рисунке 66. Уменьшение частоты равносильно увеличению длины волны, т. е. сдвигу в красную сторону. Вы помните из уроков физики, что красные волны длиннее фиолетовых (7600 Å и 4000 Å). Чем интенсивнее поле тяготения, тем эффект красного смещения становится заметнее. Наблюдать и измерить его удалось лишь для света, идущего от массивных тел.

Гравитационное смещение было предсказано Эйнштейном. Советский математик А. А. Фридман дал математическое обоснование этого явления на основе учения Эйнштейна о пространстве, времени и тяготении. Непосредственные наблюдения, которые удалось провести для некоторых звезд (например, для Белого Карлика — спутника Сириуса), дали результаты, хотя и совпадающие с теоретическими вычислениями, но при громадности расстояния точность совпадения оставляла желать лучшего. Это было тем более досадно, что красное смещение являлось одним из немногих (в то время трех*) доказательств справедли-

* Двумя другими доказательствами являются вращение орбиты планеты Меркурий и отклонение луча от далекой звезды вблизи Солнца (см. «Беседы по физике», ч. II, очерк «$E = mc^2$»).

вости общей теории относительности. Гравитационное красное смещение при большей точности наблюдения явилось бы хорошим доказательством принципа эквивалентности в общей теории относительности Эйнштейна. Как вы помните из предыдущей беседы, принцип эквивалентности утверждает равенство инертной и гравитационной масс. Свет представляет собой поток фотонов, аналогичный рентгеновским лучам и гамма-лучам (различие лишь в частоте). Поле тяготения должно действовать на свет так же, как и на другие материальные частицы, — свет должен обладать весом. Солнце излучает в пространство около четырех миллионов тонн света в секунду.

Энергия кванта, как известно, пропорциональна ее частоте: $E = h\nu$, где $h$ — постоянная Планка.

С другой стороны, из формулы взаимосвязи массы и энергии, установленной Эйнштейном, следует, что $E = mc^2$, где $c$ — скорость света, а $m$ — инертная масса.

Сопоставляя эти два равенства, можем найти инертную массу фотона:

$$m = \frac{h\nu}{c^2}.$$

Применяя принцип эквивалентности, т. е. заменяя инертную массу тяжелой, мы можем подсчитать работу на «поднятие» фотона, или $\gamma$-кванта, на высоту $H$ против силы тяжести по обычной формуле работы $A = PH = mgH$ (здесь $m$ — масса тяжелая).

Заменяя тяжелую массу инертной, получим:

$$A = \frac{h\nu gH}{c^2}.$$

Очевидно, на эту работу израсходовалась часть энергии $\gamma$-кванта, полученной им в момент испускания его звездой; этой потери энергии соответствует уменьшение частоты, т. е. $A = \Delta E$, а $\Delta E = h\Delta\nu$ , значит,

$$\Delta\nu = \frac{\nu gH}{c^2}.$$

Отношение уменьшения частоты кванта к первоначальной его частоте в момент испускания и будет количественно выражать красное смещение. Поскольку первоначальная энергия кванта $E = h\nu$, то относительная потеря энергии (и частоты) составит

$$\frac{\Delta\nu}{\nu} = \frac{gH}{c^2}$$

(здесь $g$ есть ускорение силы тяжести на поверхности звезды, излучающей квант).

В случае если $H = R$ ($R$ — радиус звезды), то, как это доказывается в механике, энергии фотона $mgR$ будет вполне доста-

точно, чтобы, подобно ракете, обладающей второй космической скоростью, уйти из поля тяготения, навсегда покинуть звезду и улететь в космос (см. «Беседы по физике», ч. I. «Человек не всегда останется на Земле»). Красное смещение для такого излученного кванта будет выражаться формулой:

$$\frac{\Delta\nu}{\nu}=\frac{gR}{c^2}.$$

Из астрономических наблюдений могут быть определены радиус и масса звезды, а отсюда и ускорение силы тяжести на звезде.

Применим принцип эквивалентности (масса тяжелая равна массе инертной), тогда выражение

$$m_{и}g=\gamma\frac{m_{т}M}{R^2}$$

преобразуется в

$$gR=\gamma\frac{M}{R};$$

тогда

$$\frac{\Delta\nu}{\nu}=\frac{\gamma M^*}{Rc^2},$$

$c^2$ (квадрат скорости света) — огромное число, поэтому красное смещение $\frac{\Delta\nu}{\nu}$ только для звезд очень большой массы и малого радиуса можно было (до открытия Мессбауера) измерить оптическим спектрометром. Белый Карлик Сириуса как раз оказался наиболее подходящим для этого, так как сила тяжести на нем в 30 000 раз превосходит земное тяготение.

Мессбауер открыл способ, позволяющий определять гравитационное красное смещение в поле тяготения Земли в лабораторных условиях, и притом с точностью до 0,0000000000001%. Вы, конечно, хотите теперь познакомиться с тем, как же он это сделал?

**5. Эффект Мессбауера.** Заглянув в «Физический энциклопедический словарь» (т. III, изд. 1963 г.), вы прочтете: «Мессбауера эффект — упругое испускание или поглощение $\gamma$-квантов атомными ядрами».

---

* Не досадуйте на труд, который может вам доставить чтение страниц с математическими выкладками, и не пропускайте их без внимания при чтении. Если вы это сделали, вернитесь назад и перечитайте внимательно эти страницы еще раз. «Беседы по физике» не развлекательная книга, их цель — познакомить вас с основными принципами и методами физики. Исключение математики чрезвычайно снизит полезность книги.

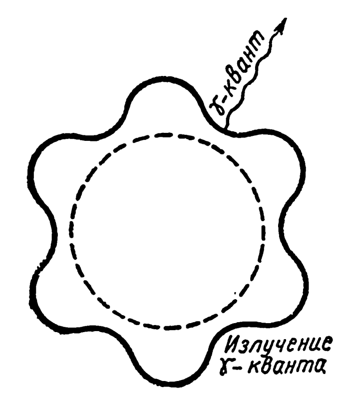
Эффект Мессбауера определяют еще и как «безотдаточное испускание и безотдаточное поглощение γ-лучей атомами твердого тела». Мало понятно? Постараюсь элементарно изложить содержание открытия.

Г-лучи, или γ-кванты, испускаются возбужденными ядрами при радиоактивных превращениях и ядерных реакциях. Еще на заре атомного века, когда супругами Кюри был открыт радиоактивный распад атома, γ-лучами назвали лучи, которые в отличие от α- и β - лучей не отклоняются ни магнитным, ни электрическим полем. Впоследствии было установлено, что γ-лучи — это электромагнитные волны, аналогичные волнам света и лучам Рентгена, только имеющие еще более короткую длину волны (от 1 до 0,001 Å).

При излучении γ-кванта ядро освобождается от излишка энергии, приводившего его в возбужденное состояние, и возвращается в свое нормальное, основное состояние (рис. 67). Обратное явление, т. е. возбуждение ядра, происходит при поглощении γ-кванта; но для того, чтобы ядро поглотило γ-квант, необходимо, чтобы частота этого кванта была в точности равна частоте кванта, который данное ядро может испускать.

Но ведь это условие резонанса? Да! Привести ядро в возбужденное, т. е. в колебательное, состояние возможно только при наличии у него энергетического уровня, соответствующего энергии поглощаемого кванта.

Что же является источником γ-излучения? Для наблюдения эффекта Мессбауера оказалось удобным применить радиоактивный кобальт $^{57}_{27}$Co, который с периодом полураспада в 280 дней переходит в радиоактивный же изотоп железа $^{57}_{26}$Fe с очень коротким периодом жизни в возбужденном состоянии ($10^{-7}$ *сек*). Переходя в основное состояние, этот изотоп железа испускает γ-квант.



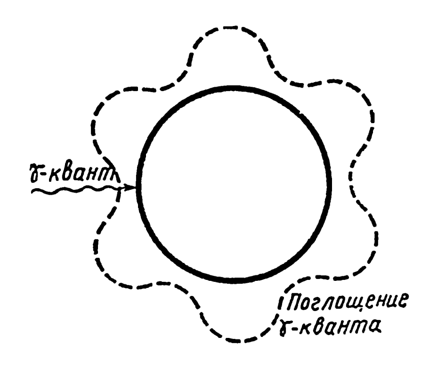




Рис. 67. Резонансное излучение гамма-кванта.




Рис. 68. Явление отдачи при прыжке с лодки.

Для проведения эксперимента на пластинку железа $^{57}_{26}$Fe наносился путем возгонки слой радиоактивного кобальта. После этого пластинка некоторое время отжигалась, чтобы кобальт успел продиффундировать на небольшую глубину внутрь железа. Железо, как и всякий металл, имеет кристаллическое строение, поэтому образовавшееся после внедрения кобальта возбужденное ядро железа оказывалось включенным в кристаллическую решетку из подобных ему ядер других атомов железа. Это обстоятельство имеет решающее значение, и в этом заключается сущность открытия Мессбауера. Внимание! Дело здесь в следующем.

Если бы ядро $^{57}_{26}$Fe было изолировано, не связано с решеткой, то при испускании $\gamma$-кванта произошло бы явление отдачи, подобное тому, какое мы наблюдаем, когда человек спрыгивает с лодки (рис. 68) или когда пушечное ядро вылетает из орудия. Откатываясь назад, лодка или орудие уносят с собой часть энергии (мы уже упоминали об этом, говоря о правиле Стокса).

При вылете гамма-кванта из ядра часть энергии кванта идет на эффект отдачи, а потому энергия и частота излучаемого кванта оказываются меньше, чем в случае, если бы отдачи не происходило.

Энергия излученного кванта меньше, чем энергия поглощенного, и потому, если направить квант, излученный $^{57}_{26}$Fe, на такую же пластинку невозбужденного железа, то она квант не поглотит из-за отсутствия условия резонанса.

Чтобы уничтожить эффект отдачи при вылете пушечного ядра из орудия, тело орудия скрепляют с землей при помощи сошников. Мессбауеру пришла мысль закрепить ядра атомов, излучающих $\gamma$-квант, путем включения в кристаллическую решетку радиоактивного кобальта, как было описано выше. Тогда импульс отдачи передается не изолированному ядру, а всему кристаллу в целом. Из-за большой массы кристалла энергия на отдачу уменьшается настолько, что вылетающий квант

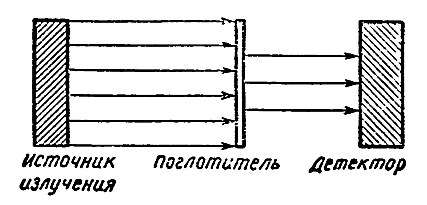



Рис. 69. Схема эксперимента Мессбауера.

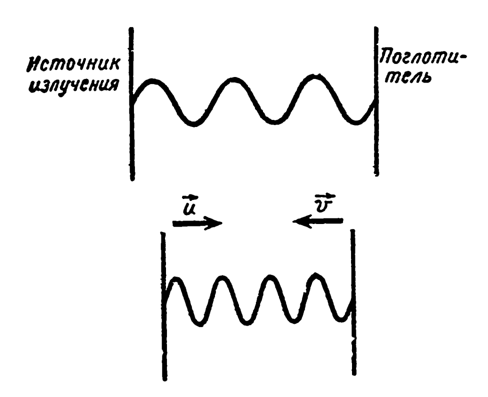



Рис. 70. Восстановление резонанса за счет эффекта Допплера.

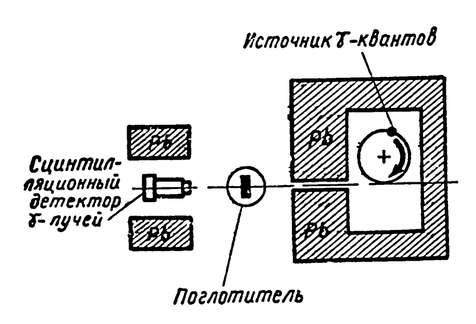



Рис. 71. Схема установки в опытах Мессбауера.

покидает ядро с энергией, достаточной для резонанса (для поглощения второй пластинкой).

Принципиальная схема эксперимента для наблюдения резонансного поглощения γ-лучей показана на рисунке 69. В результате поглощения γ-лучей детектор отмечает уменьшение падающих на него квантов. В случае резонанса это уменьшение достигает максимума.

Детектор представляет собой счетчик γ-квантов сцинтилляционного типа. Простейшие такие счетчики — спинтарископ и счетчик Гейгера изучаются в школьном курсе физики. Описание более сложного прибора, применяемого в данном случае, мы приводить не будем — для нашей беседы это уже техническая деталь.

Резонанс в опыте Мессбауера может быть нарушен или путем относительного движения источника и поглотителя, или вследствие различных внешних влияний, приводящих к изменению частоты гамма-квантов. Так, разности температур источника и поглотителя всего на 1° С уже достаточно, чтобы нарушить резонанс.

Резонанс можно восстановить за счет эффекта Допплера, для чего надо источнику или поглотителю сообщить движение навстречу друг другу или в противоположные стороны (рис. 70).

На рисунке 71 показана схема опыта самого Мессбауера. Источник γ-квантов помещался на диске внутри

свинцовой камеры. Диск приводился во вращение, скорость которого можно было измерять и контролировать. При вращении в направлении, показанном на рисунке, источник в нижней половине своего пути приближался к поглотителю, при обратном вращении диска источник будет удаляться. Регулируя скорость сближения или удаления источника и поглотителя, можно добиться острого резонанса. Ведь согласно принципу Допплера при относительном движении источника и поглотителя частота изменяется, и это изменение можно подобрать таким, чтобы компенсировать нарушение резонанса, чем бы оно ни было вызвано.

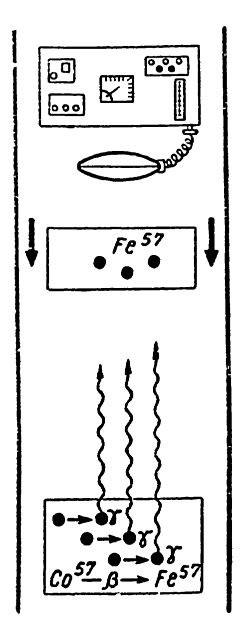



Рис. 72. Схема опыта для проверки общей теории относительности.

Эффект Мессбауера получил большое применение в исследованиях физики твердого тела, ядерной физики.

Нас будет интересовать, каким образом эффект Мессбауера используется для проверки общей теории относительности.

На основании теории тяготения Эйнштейна можно подсчитать, какое изменение частоты вызывает уже не поле тяготения сверхтяжелой звезды, а поле тяготения Земли. Расчет показывает, что при поднятии на высоту 10 *м* энергия кванта уменьшается (квант «краснеет»). Правда, это уменьшение частоты чрезвычайно мало — всего на $10^{-13}$%. Однако при помощи метода Мессбауера можно измерить столь малое изменение, и результаты эксперимента совпадают с теорией.

Схема опыта показана на рисунке 72. Источник $\gamma$-лучей и их приемник помещались в башне Гарвардского университета (США) в вертикальной трубе на расстоянии 20 *м* друг от друга. Здесь же находилось устройство, регистрирующее гамма-кванты. Источником $\gamma$-квантов служило железо $^{57}_{26}$Fe в возбужденном состоянии. Ядра этого изотопа испускают гамма-кванты определенной частоты. Поглотитель (приемник) состоял из тех же ядер, но в невозбужденном состоянии.

Были приняты все меры для устранения посторонних влияний. Для полной компенсации возможных возмущений, чтобы испущенные источником гамма-кванты поглощались, поглотитель можно было медленно перемещать в направлении к источнику. Результаты эксперимента дали совпадение с предсказаниями теории.

Таков один из наиболее сложных физических экспериментов наших дней. И не знаешь, чем более восхищаться: гениальным теоретическим предсказанием Эйнштейна или небывалой до сих пор точностью эксперимента современной физики.

Рис. 73. След шарика на вращающемся диске.

## КОГДА НЕСПРАВЕДЛИВ ЗАКОН ИНЕРЦИИ

### (ИНЕРЦИАЛЬНЫЕ И НЕИНЕРЦИАЛЬНЫЕ СИСТЕМЫ)

Укрепите на оси центробежной машины в горизонтальной плоскости гладкий диск и приведите его во вращение (в домашних условиях вместо центробежной машины можно использовать проигрыватель или патефон). От центра диска покатите в направлении радиуса шарик, предварительно покрытый копотью или невысыхающей краской (рис. 73). Силы трения в расчет принимать не будем. Поскольку на шарик никакие силы не действуют, он должен продолжать движение в радиальном направлении по линии *OA*. Так оно и будет, если смотреть на диск сверху. Когда шарик соскочит с диска, остановите машину и посмотрите, какой след оставил шарик на поверхности диска. Спираль! Шарик, на который не действовали никакие силы, прочертил не прямую линию, а спираль. Выходит, что для наблюдателя, связанного с вращающимся диском, закон инерции неприменим. Заметьте, что силы трения мы не учитывали и шарик совершенно не был связан с диском и двигался свободно, но по мере продвижения в точки 1, 2, 3, ... для неподвижного наблюдателя, смотрящего сверху, шарик для наблюдателя, связанного с вращающимся диском, будет попадать в точки 1′, 2′, 3′, ... на приходящих последовательно на линию *OA* радиусах I, II, III, ...

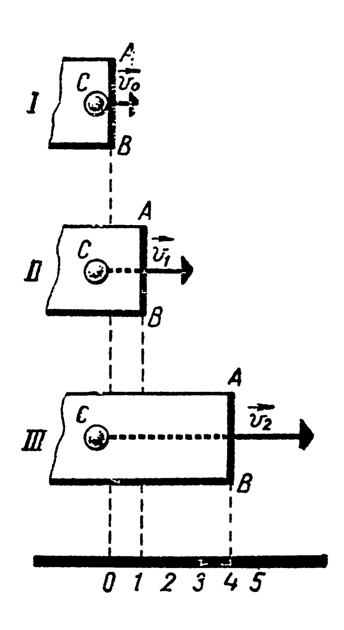



Рис. 74. Движение шарика на полу ускоренно движущегося вагона.

Направление закручивания спирали зависит от направления вращения диска. Если диск будет вращаться по часовой стрелке, то

спираль закручивается против; если же диск вращается против часовой стрелки (так вращается земной шар, если смотреть извне на Северный полюс), то спираль будет закручиваться по часовой стрелке, т. е. движение будет отклоняться от прямолинейного вправо. О том, к каким интересным и важным следствиям для обитателей Земли приводит это обстоятельство, мы скажем немного позже, пока же обратите внимание на то, что во вращающейся системе шарик, катящийся без воздействия на него сил, движется не только непрямолинейно, но и неравномерно. На чертеже отчетливо видно, что дуги спирали с переходом на новые последовательные радиусы, т. е. за равные промежутки времени, становятся все больше и больше. Вопреки закону инерции! Вот почему такая система отсчета, как вращающееся тело, называется неинерциальной системой. Однако не только вращающаяся система, но и всякая движущаяся с ускорением система будет неинерциальной.

Допустим, закопченный шар лежит на полу вагона, движущегося равномерно ускоренно (рис. 74, вид сверху). Трения нет. Для наблюдателя в неподвижной системе координат вне вагона шар остается на месте в точке $C$, а пол вагона ускользает из-под шара равноускоренно (положения I, II, III через равные промежутки времени). Для наблюдателя же, неподвижно связанного с вагоном, шар удаляется ускоренно от стенки вагона $AB$, вычерчивая на полу свой след. Опять нарушение закона инерции, ведь на шар не действует какое-нибудь другое тело и он должен бы оставаться в покое.

Однако наш движущийся с вагоном наблюдатель не хочет расстаться с хорошо усвоенными им законами Ньютона и согласно второму закону движения ищет причину ускорения, т. е. силу, его вызывающую. Эту силу он называет силой инерции. Итак, для наблюдателя, связанного с вагоном, шар движется с ускорением под действием силы инерции.

То же можно сказать и о шарике, катящемся по вращающемуся диску: он удаляется от центра диска ускоренно под действием силы инерции. Силу инерции, под действием которой вращающееся тело стремится удалиться от центра окружности, называют поэтому центробежной силой инерции (она существует с точки зрения наблюдателя, связанного с вращающейся системой). Это она, центробежная сила инерции, приложенная к камню, вращающемуся на веревке вокруг руки, побуждает камень натягивать веревку. При достаточной скорости вращения центробежная сила разрывает веревку, рвет в куски циркулярные пилы и маховые колеса.

Рассмотрение условий, в которых находится система, движущаяся с ускорением, часто оказывается более простым, если стать на точку зрения наблюдателя, скрепленного с этой системой. Именно с этой точки зрения рассматривается движение, когда говорят о центробежной силе, приложенной к телу, опуская при этом существенное добавление — силе инерции. Вы

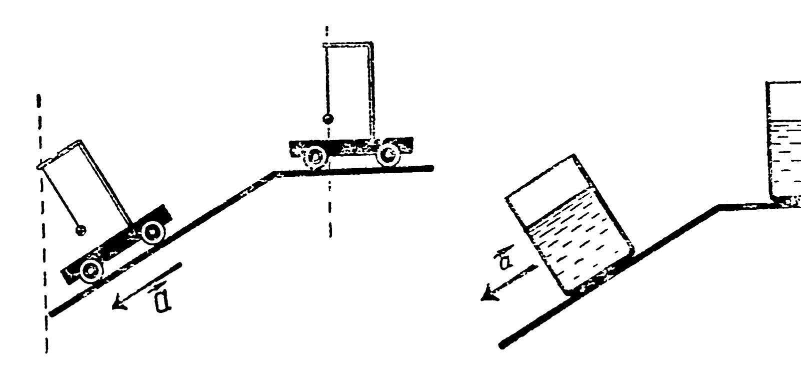



Рис. 75. Маятник на скатывающейся тележке.

Рис. 76. Поверхность жидкости не всегда горизонтальна.

можете встретить это выражение в статьях и книгах, но отдавайте при этом себе ясный отчет в том, что это с вами говорит наблюдатель, принадлежащий к неинерциальной системе.

Силы инерции при всем удобстве пользования этим понятием резко отличаются от сил инерциальной системы. Прежде всего тем, что трудно или невозможно указать источник такой силы, указать тело, воздействие которого на вращающееся тело проявляет себя в виде действия силы инерции. С точки зрения классической механики можно было бы утверждать, что силы инерции — фиктивные силы, а не реальные. Ведь всякая реальная сила, действующая на тело, имеет своим источником какое-то другое тело и выражает взаимодействие двух тел. Поэтому она никогда не бывает одна, а всегда сопровождается равной и противоположной силой противодействия, приложенной, однако, ко второму телу. Источника сил инерции в виде другого тела нет, отпадает, следовательно, и вопрос о силе противодействия. В неинерциальной системе вы такую силу не найдете. Ее надо искать вне системы. В разобранном случае прямолинейного движения вагона источником силы инерции является та внешняя сила (тяга локомотива), которая сообщает ускорение всей системе. Но, обращаясь к ней, вы уже покидаете неинерциальную систему и смотрите глазами внешнего наблюдателя: видите локомотив, ускоряющий поезд, и видите покоящийся (вследствие инерции) на полу вагона шар, из-под которого ускоренно ускользает пол (трение исключено). Стоит исчезнуть ускорению, как движение поезда станет равномерным и, не испытывая на себе действия сил, шар тоже потеряет ускорение.

Проделайте еще следующий простой опыт: изготовьте, хотя бы из деталей «конструктора», тележку, на которой укрепите подставку с маятником. Затем поставьте тележку на длинную наклонную доску и пустите ее катиться с ускорением вниз. Глядя со стороны, вы увидите, что маятник висит не по отвесу,

а отклонен перпендикулярно к наклонной плоскости. Для воображаемого наблюдателя на тележке маятник представляется висящим отвесно. Два наблюдателя — две точки зрения. Для внешнего наблюдателя отклонение маятника вызвано инерцией — маятник «не желает» участвовать в ускоренном движении, а для наблюдателя с тележки маятник вытянулся «по отвесу» под действием силы тяготения (рис. 75).

Вместо маятника можно было бы наблюдать за изменением поверхности воды в стакане, поставленном на тележку. При скатывании тележки с ускорением поверхность воды перестала бы быть горизонтальной (рис. 76). Если остановить тележку рукой, то маятник опять повиснет вертикально, поверхность воды в стакане расположится горизонтально.

Классическая механика вводила силы инерции лишь условно, считая их фиктивными. Все же проявления действия сил инерции (отклоняющие действия, разрыв связей и пр.) объясняла просто как проявление инерции — врожденного свойства тел. Камень на веревке по инерции стремится продолжать движение по касательной к окружности, веревка его не пускает, и он натягивает веревку или даже разрывает ее.

Но что же такое инерция? Теория относительности устанавливает тождественность сил инерции и сил тяготения и объясняет их проявление как выражение взаимодействия с телами Вселенной. Но мы не можем входить в подробности этой теории.

Отметим только еще раз, что говорить о силах инерции можно только при рассмотрении ускоренного движения.

А на равномерно вращающемся диске? Вращаться равномерно — это значит сохранять постоянной угловую скорость. Линейная же скорость все время изменяет свое направление. Это изменение вызывается действием силы, направленной к центру (при помощи связи). Следовательно, здесь налицо ускорение (центростремительное ускорение), система неинерциальна и можно говорить (условно) о силах инерции.

Посмотрим, к каким следствиям приводит равномерное вращение Земли вокруг оси.

А вращается ли Земля?! Ведь большую часть своей сознательной жизни, на протяжении многих тысячелетий человечество считало, что Земля неподвижна, а вращаются Солнце, Луна и звезды. Из факта суточного изменения картины звездного неба, восхода и захода Солнца и Луны совершенно еще не следует, что это движение не соответствует реальности, что это движение кажущееся. А если бы никакого мыслящего наблюдателя не было на Земле, разве Солнце перестало бы вставать на горизонте с востока, проходить через меридиан в полдень и закатываться на западе? Не с точки зрения наблюдателя, а независимо от него все это также происходило бы относительно Земли.

На Западе и сейчас можно встретить если не защитников геоцентрической системы мира, то сторонников полного равно-

правия систем Птолемея и Коперника. Парижский астроном Шарль Нордман заканчивает свою книгу «Эйнштейн и Вселенная» такими словами: «Вертится ли Земля? Да, если вам так нравится; нет, если вам это не по душе».

Нет! К решению этого вопроса надо подходить не с точки зрения нашего вкуса или чувства, а с материалистических позиций. Проявление сил инерции на вращающейся Земле доказывает, конечно, только относительное движение Земли и окружающей ее Вселенной. С математической и кинематической точек зрения, действительно вполне безразлично, считать ли Землю вращающейся, а движение небесного свода кажущимся, или, наоборот, считать Землю неподвижной, а весь мир вращающимся вокруг нее. Но стоит только вспомнить о том, что астрономы совершенно точно установили наличие и других вращающихся небесных тел, как второе предположение станет невозможным, нелепым. Действительно, все планеты солнечной системы вращаются вокруг своих осей с различными периодами вращения и различными направлениями осей. Не может же весь мир вращаться одновременно и вокруг Земли, и вокруг Юпитера, Нептуна и других планет и их спутников, и притом с различными скоростями.

Итак, обратимся к явлениям, вызываемым вращением Земли вокруг оси, интересным и с теоретической и с практической стороны, и в то же время неоспоримо подтверждающим слова Галилея: «А все-таки вертится!»

**Сила Кориолиса.** Прежде всего обратите внимание на следующее обстоятельство. Свободный шарик в нашем опыте с центробежной машиной удаляется от центра диска не по прямой линии, не по радиусу, как мы его покатили, а по спирали. Очевидно, кроме центробежной силы инерции (помните, что рассуждение ведется в неинерциальной системе), должна быть еще другая сила, отклоняющая шарик от радиального направления. Ее называют силой Кориолиса, по имени французского инженера, открывшего ее.

Для лучшего уяснения этого нового для вас понятия рассмотрим еще следующий опыт (рис. 77). Наблюдатель, поместившийся на вращающемся стуле, стреляет из ружья в скрепленный со стулом экран. Если стул неподвижен, то пуля попадет в точку $O$ экрана. Если же стул привести во вращение против часовой стрелки, то пуля попадет в точку $O_1$. Внешний неподвижный наблюдатель, например вы, читатель, объяснит промах стрелка следующим образом: так как на пулю во время полета не действовала никакая реальная сила, то пуля летела прямолинейно от дула до экрана, но за время ее полета экран повернулся и под пулю подошла другая точка.

Вращающийся же стрелок, который связан с экраном, такого объяснения дать не может, для него экран неподвижен, так же как неподвижны относительно друг друга предметы и пассажиры внутри вагона мчащегося поезда. От-

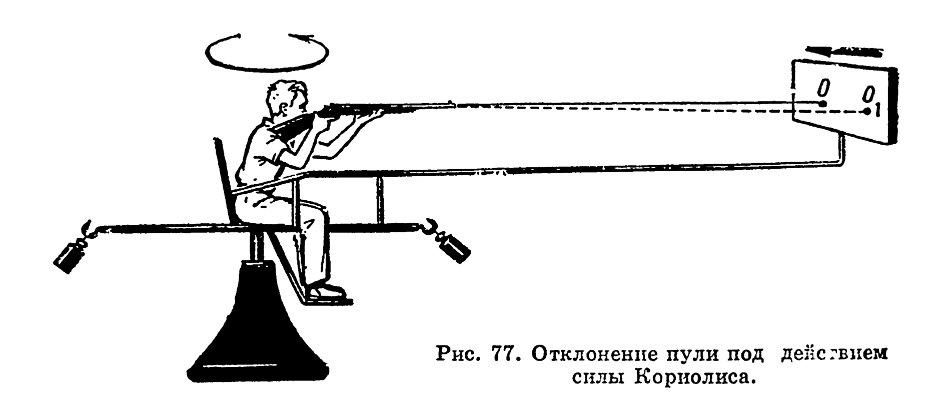



Рис. 77. Отклонение пули под действием силы Кориолиса.

клонение пули от цели наш наблюдатель объяснит действием какой-то силы, направленной перпендикулярно к вектору скорости. Это и есть сила Кориолиса.

Для неподвижного наблюдателя, находящегося вне вращающейся системы, не существует ни центробежной, ни кориолисовой силы — шарик катится по прямой, пуля летит прямолинейно, но конечная точка этой прямой оказывается правее вследствие поворота системы против часовой стрелки.

Проведем небольшой расчет применительно к нашему примеру с шариком. Если скорость шарика относительно диска $v$, то за время $t$, двигаясь по инерции равномерно и прямолинейно, шарик пройдет по радиусу путь $r = vt$ и достигнет точки $A$ (см. рис. 73), если диск неподвижен. В случае вращения диска точка $A$ сместится на длину дуги $s$: $s = \omega rt = v\omega t^2$.

Обозначив ускорение отклоняющей силы Кориолиса через $a$, можем написать:

$$s = \frac{at^2}{2},$$

тогда

$$\frac{at^2}{2} = v\omega t^2,$$

или

$$a = 2v\omega.$$

Следовательно, сила Кориолиса

$$F_{кор} = ma = 2mv\omega.$$

Если применить векторные обозначения, то

$$\vec{F}_{кор} = -2m\left[\vec{v}\ \vec{\omega}\right]$$

(см. беседу «Элементы векторной алгебры»).

В таком виде формула показывает, что сила Кориолиса может быть равна нулю в двух случаях: или если $v = 0$ (т. е. тело покоится относительно вращающейся системы), или если $\vec{v} \parallel \vec{\omega}$, так как векторное произведение параллельных векторов равно нулю. Нам пригодится это замечание несколько позже.

Еще раз подчеркнем, что в отличие от центробежной силы инерции, которая может быть приложена и к покоящемуся и

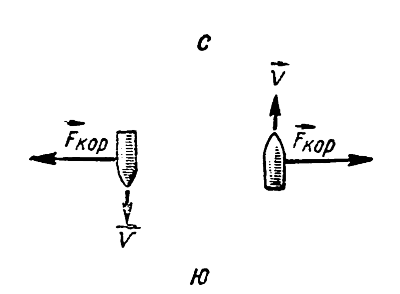


Рис. 78. Движущиеся тела в северном полушарии отклоняются вправо.

к движущемуся в неинерциальной системе телу, сила Кориолиса действует только на тела, движущиеся в этой системе, так как ее происхождение обязано переходу тела при удалении от центра в области бóльших линейных скоростей системы.

Земля вращается вокруг своей оси, следовательно, на тела, движущиеся по (или вблизи) поверхности Земли, должна действовать сила Кориолиса.

Посмотрим, к каким интересным явлениям приводит это. Мы уже отмечали, что тело, движущееся относительно системы, вращающейся против часовой стрелки, отклоняется вправо. Земной шар вращается против часовой стрелки, если смотреть на него «сверху», на Северный полюс, и по часовой стрелке, если внешний наблюдатель смотрит на Южный полюс. Поэтому тело, движущееся вдоль поверхности Земли, должно в северном полушарии отклоняться вправо по ходу движения. Это одинаково справедливо и для движения по меридиану (с севера на юг или наоборот), и для любого другого движения (рис. 78). Артиллеристам приходится учитывать это отклонение. Для дальнобойных снарядов и ракет дальнего действия отклонения достигают величин, которыми пренебрегать нельзя. Пуля, вылетающая из ружья со скоростью 500 *м/сек*, отклонится на пути в 0,5 *км* (т. е. за одну секунду) на 3,5 *см*. В «Физике для всех» Л. Д. Ландау и А. И. Китайгородского приводится пример отклонения снарядов, применявшихся во время первой мировой войны при обстреле немцами Парижа: для расстояния 110 *км* отклонение от цели достигало 1600 *м*!

На железных дорогах давно было замечено, что на двухколейных путях, с односторонним движением поездов, правые рельсы стираются изнутри сильнее левых.

Петербургский академик Карл Бэр обнаружил, что правые берега русских рек обычно бывают крутыми, а левые — пологими (закон Бэра). Из-за этого подмывающего действия текущей воды, вызываемого силой Кориолиса, некоторые реки заметно изменяют даже русло своего течения. Так, Волга во времена Ивана Грозного подходила к расположенной на ее левом берегу Казани, а в наши дни она отступила от старого города вправо на 8 *км*.

Особенно заметно размывание правых берегов у рек, текущих по меридиану в средних и высоких широтах. Только у экватора реки, текущие по меридиану, не проявляют этого свойства, так как в этом случае векторы $\vec{v}$ и $\vec{\omega}$ параллельны. Для всех других направлений и в любых широтах это явление

выступает отчетливо, если только не маскируется влиянием рельефа или структурой почвы. Вероятно, и вы можете убедиться в справедливости закона Бэра на вашей родной реке.

Морские течения тоже испытывают влияние силы Кориолиса. Знаменитое теплое течение Гольфстрим, зарождающееся в Мексиканском заливе, относится вправо к берегам Европы. В результате в городах Вашингтон и Лиссабон, расположенных на одной параллели, наблюдается резкая разница в климате: в то время как в Вашингтоне зимой идет снег, в Лиссабоне люди прогуливаются среди пальмовых аллей.

Ветры постоянного направления (пассаты), дующие в северном полушарии, отклоняются вправо. Это легко понять, если рассмотреть схему общей циркуляции атмосферы, вызываемой неравномерностью нагревания поверхности земного шара. Солнечные лучи, падая на экваториальные области более прямо, чем на области вблизи полюсов, нагревают поверхность Земли у экватора сильнее, в результате чего создаются восходящие течения; на место теплого воздуха с севера и с юга должны притекать холодные массы воздуха. Это те массы поднявшегося вверх воздуха, которые успели охладиться, не дойдя до полюсов. Получается гигантских масштабов конвекция в пределах 10—30° северной широты и

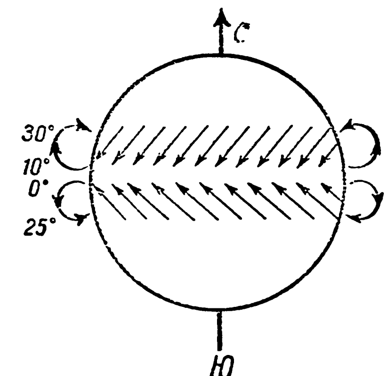



Рис. 79.
Объяснение происхождения пассатов.

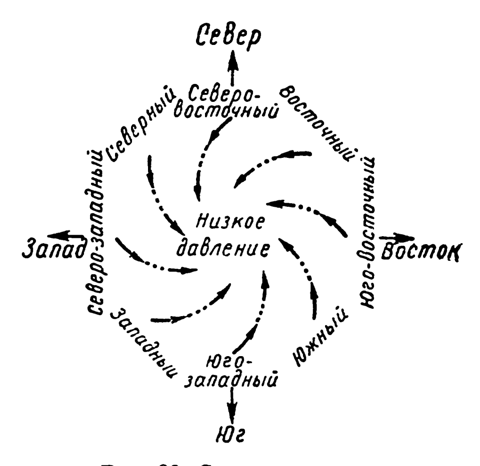



Рис. 80. Схема циклона.

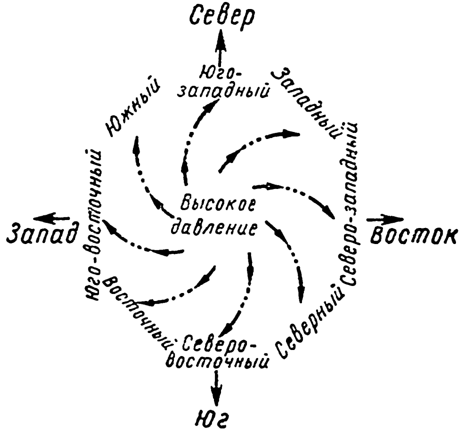



Рис. 81. Схема антициклона.

0—25° южной широты. Ветры эти дули бы по меридианам, если бы Земля не вращалась, но на вращающейся Земле направление пассатов изменяется на северо-восточное в северном и юго-восточное в южном полушарии (рис. 79).

Непрестанно день и ночь дуют пассаты в одном и том же направлении с упорным постоянством. Но когда-то еще посчастливится кому-либо из моих читателей побывать в этих широтах, чтобы лично убедиться в таком постоянстве! Давайте же пока совершим мысленное путешествие на плоту Кон-Тики, на котором смелый норвежский этнограф Хейердал с пятью товарищами совершил путешествие в 1947 г., проплыв расстояние в 4300 миль от берегов Перу до островов Полинезии. Целью экспедиции было доказать, что древние жители Перу могли доплыть на своих лодках до островов Полинезии (американская гипотеза происхождения полинезийцев). Успех предприятия был обусловлен точным анализом взаимодействия течения и ветров в этой части Тихого океана. Путешествие стало более уверенным и спокойным, когда, наконец, плот добрался до широты, где вечно дуют пассаты.

«Наконец и ветер поднялся. Он дул с юго-востока ровно и упорно. Вскоре наш парус наполнился и выгнулся вперед, а лицо Кон-Тики (резное из дерева украшение лодки в виде головы бога-покровителя перуанцев. — *М. Б.*) вспыхнуло задором. И Кон-Тики начал двигаться. Во вторую половину дня пассат уже дул во всю силу. Океан быстро покрывался ревущими волнами, набегавшими на нас сзади... Мы знали, что отныне нет никакой надежды на встречный ветер, никаких шансов вернуться назад. Мы вошли в настоящий пассат, и с каждым днем нас будет уносить все дальше и дальше в океан... Перед нами был только один выход — плыть по ветру, держа нос в сторону заката. Но ведь это и являлось как раз целью нашего путешествия — следовать по пути солнца, подобно тому как это делал, по нашему мнению, Кон-Тики со своими древними солнцепоклонниками, когда их изгнали из Перу за океан». (Т. Хейердал «Путешествие на Кон-Тики»).

В других широтах сила Кориолиса проявляет себя в образовании системы ветров — циклонов и антициклонов, смена которых составляет главную основу нашей погоды. Циклоны представляют собой колоссальных размеров вихри, спирально закручивающиеся от радиального направления вправо. В циклонах ветры направлены от периферии к центру, где давление атмосферы меньше; в антициклонах, наоборот, в центре имеется максимум давления и ветры направлены от центра. Отклоняющее действие сил Кориолиса приводит к той схеме направлений ветров, которая показана на рисунках 80, 81. Надо сказать, однако, что это лишь общая схема. В действительности циклоны образуются при встрече теплых и холодных фронтов воздушных масс и вся картина рождения, развития и исчезновения циклона

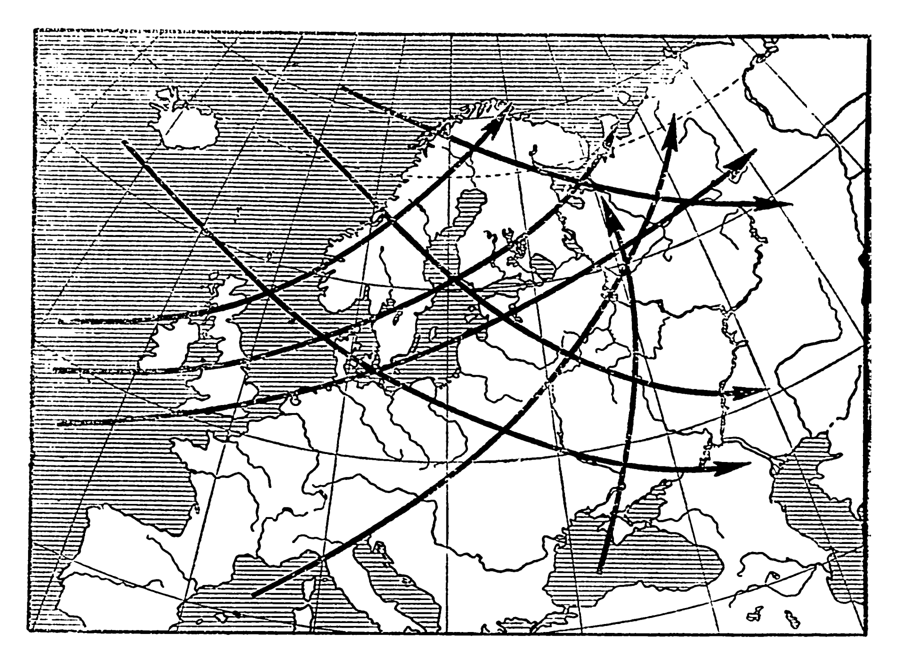


Рис. 82. Карта движения циклонов.

гораздо сложнее, чем это показано на схеме. Подробности вы можете прочесть в любой книге по метеорологии.

Циклон всегда движется таким образом, что теплый воздух оказывается справа, а холодный слева от его движения. Теплые воздушные массы обычно лежат на юге, а холодные на севере, именно этим объясняется, почему большинство циклонов движется с запада на восток или с северо-запада на юго-восток (рис. 82). Какая наступит погода, это зависит от того, какая часть циклона пройдет через данное место, но в основном циклоны приносят ненастную, теплую погоду, антициклоны же — ясную погоду: жару летом, мороз зимой. Указанное выше направление движения циклонов дает нам довольно надежный способ предвидения погоды. Метеорологи говорят, что «погода рождается в Исландии». Это оттуда, с северо-запада, движется большинство циклонов. Поэтому, если вы по радио в сводке погоды услышите о погоде в Архангельске, Ленинграде, Прибалтике, то довольно уверенно можете предсказать аналогичную погоду через день, два в Москве. Конечно, такое «предсказание» ни в коем случае не может конкурировать с прогнозом погоды, даваемым синоптиками на основании изучения карт погоды.

Все рассмотренные нами примеры движений по поверхности Земли являются убедительными доказательствами того, что Земля действительно вращается. Но исторически первыми доказательствами вращения Земли были отклонение падающих тел от вертикали к востоку и маятник Фуко.



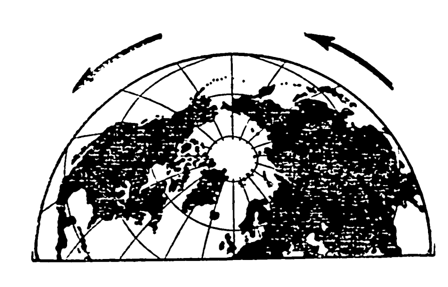


Рис. 83. Самый дешевый способ путешествия.

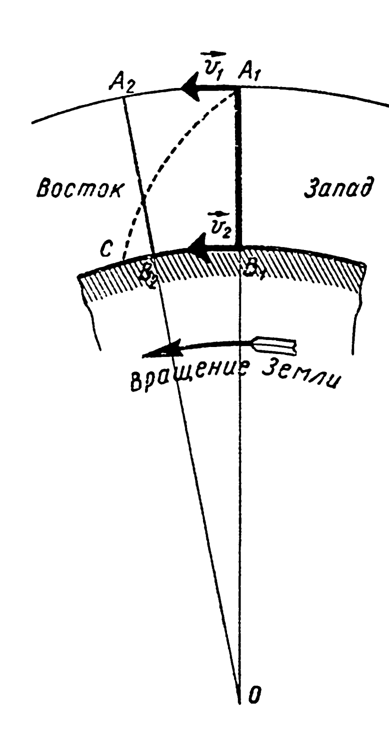



Рис. 84. Отклонение падающих тел к юго-востоку.

XVII век! Страстная борьба двух мировоззрений не закончилась после вынужденного отречения Галилея от «ереси вращения Земли». Теория Коперника своей логичностью привлекала все больше и больше сторонников, но защитники системы Птолемея, опиравшиеся на авторитет библии и тексты Аристотеля, упорно сопротивлялись. Противники учения Коперника о движении Земли выдвигали одно возражение за другим. Между прочим, они утверждали, что если бы Земля вращалась вокруг оси, то падающие тела должны были бы отставать от вертикали. Ведь пока тело падает, Земля успеет повернуться, и место падения окажется западнее, чем при вертикальном падении.

В «Занимательной физике» Я. И. Перельмана есть такой проект-шутка самого простого и дешевого способа путешествия: стоит только подняться над Землей и продержаться в воздухе хотя бы несколько минут, чтобы опуститься уже совершенно в другом месте, далеко к западу. Вместо того чтобы предпринимать утомительные путешествия через материки и океаны, можно неподвижно висеть над Землей и выжидать, пока она сама подставит путешественнику место назначения (рис. 83). Заманчиво? Но, надеюсь, вы не будете проверять это спытом. А вот во времена Галилея подобным же образом рассуждали противники Галилея и пытались проверить это на опыте, но всегда безрезультатно — тела падали к основанию башни или мачты, с которых их роняли.

В следующем поколении Ньютон в связи со своими работами о возмущениях в движении небесных тел пришел к выводу, совершенно противоположному тому, что утверждали противники теории вращения Земли.

В 1679 г. в письме к Роберту Гуку, бывшему в то время секретарем Королевского общества (высшее научное учреждение в Англии, аналогичное нашей Академии наук), Ньютон утверждал: «... так как вершина башни имеет бо́льшую скорость вращения, чем основание, то тела, падающие с вершины, сохраняя во время падения бо́льшую вращательную скорость, должны опережать Землю и падать к востоку от основания башни». Сначала Гук ответил уклончиво, критикуя предложение проверить заключение Ньютона опытом, но члены Королевского общества настаивали на проверке и в конце концов Гук сообщил Ньютону, что проверку он произвел и она подтвердила ожидания Ньютона. Что касается траектории падающего тела, то она, по мнению Гука, должна быть не спиралью, как первоначально предполагал Ньютон, а параболой, и, кроме того, отклонение тела от вертикали происходит не к востоку, а к юго-востоку. Из-за споров по другим вопросам, главным образом в области оптики, отношения Гука с Ньютоном в это время были скверные, однако Ньютон в ответном письме в сухой, но корректной форме согласился с поправкой Гука.

Рисунок 84 поясняет сказанное. Отклонение к югу, вызванное несовпадением направлений веса и силы притяжения тела к центру Земли, на рисунке не предусмотрено, так как оно невелико. Опыт неоднократно проверялся с более точными средствами измерения, чем во времена Ньютона, и факт отклонения падающих тел к востоку от отвеса установлен окончательно. Величина отклонения при падении с высоты 70—80 *м* составляет всего

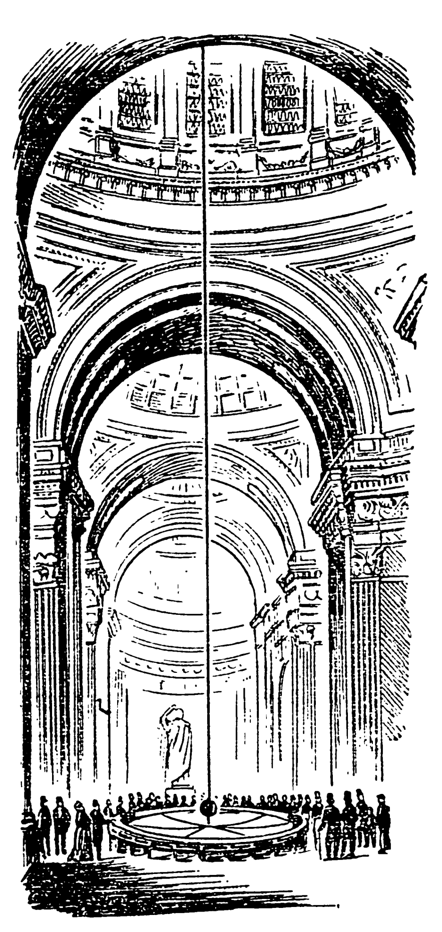


Рис. 85. Маятник Фуко.

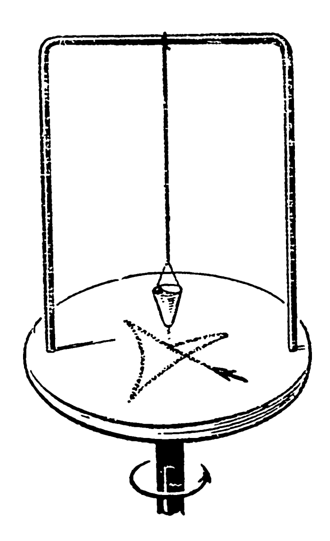



Рис. 86. Модель опыта Фуко.

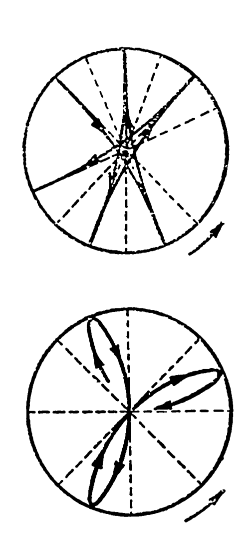


Рис. 87. След, вычерчиваемый маятником Фуко.

около 10 *мм*, поэтому естественно, что долгое время явление оставалось необнаруженным. Современные средства наблюдения позволяют определить отклонение и при гораздо меньших высотах. Так, проведенное в 1912 г. в Риме испытание с высоты 22,96 *м* дало отклонение всего $0{,}899 \pm 0{,}027$ *мм*. Вычисленная отсюда скорость вращения Земли только на 0,001% отличается от значения скорости, найденного астрономическими методами.

В тесной связи с исследованием движения тел на поверхности вращающейся Земли находится знаменитый опыт Фуко с маятником. Начало изучению колебаний маятника положено было, как известно, Галилеем. Очевидно, ему был знаком и тот факт, что свободно подвешенный маятник сохраняет плоскость своего колебания. Но уже флорентийские академики (Флорентийская академия была основана учениками Галилея в 1657 г.) наблюдали отклонения маятника от первоначальной плоскости колебаний. Чтобы устранить это отклонение, они рекомендовали подвешивать маятник на двух расходящихся нитях, «так как обыкновенный маятник, подвешенный на одной нити, при свободном ходе (по какой причине, мы в это входить не будем) незаметно отклоняется от своего первоначального пути». Сделать отсюда вывод о вращении Земли они не решались, так еще была свежа в памяти печальная судьба Галилея.

Только через два столетия, в 1851 г., Леон Фуко ставит опыт, подтверждающий вращение Земли. Опыт в еще большем масштабе был повторен Фуко в Пантеоне (здание с огромным куполом — усыпальница великих людей Франции) (рис. 85). Идею опыта легко пояснить на такой модели, которую каждый

может изготовить самостоятельно. Укрепим на кругло подставке согнутый дугой металлический прутик. В верхней точке дуги подвесим на нитке небольшой грузик. Заставим теперь этот маятник качаться в плоскости дуги. Колебания будут происходить в одной плоскости, но если повернуть весь прибор на некоторый угол, то мы увидим, что плоскость качания, оставаясь прежней по отношению к окружающей обстановке комнаты, выйдет из плоскости дуги. Поворачивая прибор на все больший и больший угол, мы увидим, что и отклонения маятника от первоначальной плоскости дуги становятся все больше. При повороте на полную окружность маятник снова приходит в плоскость дуги (рис. 86).

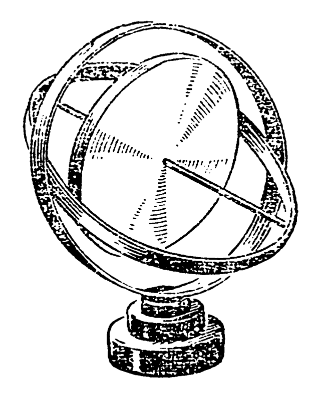


Рис. 88. Модель гироскопа.

В опыте Фуко в парижском Пантеоне длина маятника была 67 *м*, шар маятника весил 28 *кгс* и был снизу снабжен острием, которым он прочерчивал след своего качания на песчаной арене. Вычерчиваемые маятником траектории в зависимости от момента его пуска имеют вид или «звездочки», или «розетки» (рис. 87), но во всех случаях траектории изгибаются в одну и ту же сторону под действием силы Кориолиса. Наблюдение этих траекторий на модели опыта Фуко могло бы послужить темой интересной домашней работы. В качестве маятника рекомендуем взять склеенную из плотной бумаги вороночку, в которую поместить сухой, хорошо просеянный песок. Высыпаясь из воронки во время качаний, песок будет ложиться на положенную на подставке бумагу в виде указанных выше фигур.

Опыт Фуко многократно повторялся другими исследователями и демонстрировался в разных странах. Между прочим, и у нас в Исаакиевском соборе в Ленинграде в качестве экспоната антирелигиозного музея демонстрируется подобный маятник.

Конструируя приборы для изучения вращательного движения тел, Фуко пришел к изобретению прибора, получившего название гироскопа (рис. 88), и разработал следующие законы движения этого прибора. Если позволить оси вращения гироскопа двигаться только в горизонтальной плоскости, то ось стремится установиться по меридиану, и притом так, что вращение прибора происходит так же, как вращение Земли. Если же оси позволить двигаться в плоскости меридиана (вертикально), то она устанавливается параллельно оси Земли.

Теория гироскопа ввиду ее сложности не может быть нами изложена. Но нетрудно понять, к каким исключительно важным практическим следствиям приводят эти его свойства. Гироскоп дает нам возможность построить навигационный компас без магнитной стрелки. Большие железные массы на кораб-

лях всегда были предметом большой заботы при вождении кораблей, так как оказывали отклоняющее влияние на стрелку компаса. Гироскопический компас этого недостатка лишен.

Устойчивость оси вращающегося волчка, каким в принципе является гироскоп, позволила применить гироскоп для стабилизации движения многих конструкций на транспорте, в ракетном и торпедном механизмах, в управлении самолетом (автопилот) и других важных случаях.

## БЫСТРЕЕ ЗВУКА
### (УДАРНЫЕ ВОЛНЫ)

Эхо — имя нимфы, зачахшей от безнадежной любви к юноше Нарциссу так, что от нее остался только голос. Вероятно, и вы, читатель, забавлялись не раз перекличкой с эхом, находясь на берегу реки или на лесной поляне. Эхо — вы, конечно, это знаете — есть не что иное, как звук, отраженный от достаточно удаленного препятствия: леса, крутых берегов реки и пр. Вы, наверно, умеете определять скорость звука, измеряя промежуток времени между произнесенным вами и отраженным звуком. Для этого, как вы помните, надо разделить двойное расстояние, отделяющее вас от отражающей преграды, на этот промежуток времени:

$$c = \frac{2l}{t}.$$

Следует только предупредить вас, что расстояние от отражающей поверхности $l$ должно быть достаточно большим (около полкилометра), иначе слишком быстро вернувшийся звук трудно будет отличить от основного произнесенного звука. Вообще описанный опыт довольно примитивный и большой точности не дает. Недаром на протяжении двух столетий (XVII—XIX вв.) исследователи не могли получить согласованных результатов.

Первым пытался определить скорость звука в 1630 г. ученый монах Мерсенн. Он измерял промежуток времени между появлением огня и звука при выстреле из ружья. Зная расстояние до стрелявшего, он вычислил скорость звука в 1380 футов в секунду (около 450 *м/сек*).

Теоретический вывод формулы для определения скорости звука дал Ньютон. Однако вычисленная по его формуле

$$c = \sqrt{\frac{p}{\rho}},$$

где $p$ — давление, $\rho$ — плотность газа, скорость звука в воздухе получалась значительно меньше экспериментальной, а именно 260 *м/сек*. Многократное повторение эксперимента по тому же принципу, что и у Мерсенна, не устраняло разницы почти в 200 *м/сек*, а между тем ученые не могли обнаружить никакой ошибки в выводе Ньютона.

Наиболее известным в истории физики контрольным опытом был опыт парижских академиков, проведенный в 1738 г. Холодной мартовской ночью две группы ученых-наблюдателей в сопровождении большого числа любопытных парижан в течение нескольких часов наблюдали за стрельбой из пушек, расположенных на расстоянии в несколько километров друг от друга. Отсчет времени производился по точнейшим парижским хронометрам. Полученное из наблюдений среднее значение скорости звука оказалось 337 *м/сек*. Но оставалось все же большое расхождение с формулой Ньютона.

Лишь много лет спустя гениальный французский математик Лаплас указал причину расхождения и дал новую формулу для определения скорости звука в воздухе:

$$c = \sqrt{\frac{pk}{\rho}},$$

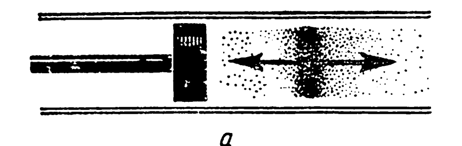
где $k$ есть термодинамический коэффициент, равный отношению теплоемкости газа при постоянном давлении $c_p$ к теплоемкости при постоянном объеме $c_v$. Для воздуха $k = \frac{c_p}{c_v} = 1{,}4$.

Введение этой поправки вызвано тем, что в процессе распространения звука происходит сгущение слоев воздуха, сопровождающееся повышением температуры. Ньютон же считал процесс изотермическим. Формула Лапласа давала хорошее совпадение с экспериментом. Вычисленная по этой формуле скорость звука при 0° С равняется 332 *м/сек*, а при 15° С — 340 *м/сек*, или 1224 *км/ч*. Новейшие методы, основанные не на прямом наблюдении звуковых и световых сигналов, а на явлении интерференции, позволили определить скорость звука уже в пределах лабораторного стола.

Что же представляет собой скорость звука? Скорость звука есть не что иное, как скорость распространения упругих колебаний в среде — твердой, жидкой или газообразной.

Вот резким движением поршня в трубе вы создали уплотненный слой воздуха, а потом вернули поршень в первоначальное положение. Подобно сжатой пружине, слой воздуха (рис. 89, *а*) начнет расширяться в обе стороны, заполняя образовавшееся разрежение слева и вызывая сгущение справа. Таким образом, сгущение будет перемещаться вдоль оси трубы все правее и правее. Распространяется сгущение, а не частицы воздуха, от одного конца трубы до другого. Каждая частица лишь колеблется влево и вправо около положения равновесия. Скорость распространения сгущенного состояния и будет скоростью распространения упругой деформации среды.

Если периодически повторять движение поршня вперед и назад, то в воздушной среде образуется ряд последовательных сгущений и разрежений, бегущих вдоль оси трубы (рис. 89, *б*). Такое движение называют волновым; в простейшем случае оно подчиняется закону синусоидальной функции.



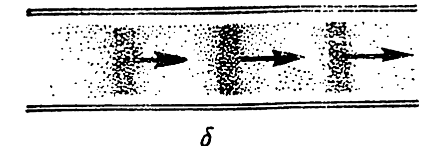




Рис. 89. Образование звуковых волн в воздухе.

Чтобы сделать более понятным волновой характер движения, мы воспользуемся следующим графиком. Будем откладывать на вертикальной оси координат значения смещения какой-нибудь частицы от положения ее равновесия, а по горизонтальной оси время (рис. 90). Полученная так синусоида показывает изменение смещения как функцию времени, но в то же время позволяет построить и картину пространственного расположения частиц, для чего надо смещения точек *1*, *2*, *3* и т. д. повернуть на 90° на горизонтальную ось.

Расстояние от одного сгущенного состояния (или разреженного) до следующего такого же состояния, или, что то же самое, расстояние между двумя последовательными точками среды, находящимися в одинаковой фазе, например между точками $a_1$, $a_2$, с которых начинается смещение вправо, или между точками $в_1$, $в_2$ (смещение влево), называется длиной волны $\lambda$, а число волн, проходящих через точку в секунду, — частотой колебательного движения $\nu$. Для звуковых волн частота звука является характеристикой звукового ощущения, известного под названием высоты звука или тона (*до*, *ре*, *ми* и т. д.). Чем больше частота, тем выше тон.

По длине волны и числу волн в секунду можно вычислить скорость звука $c$: $c = \lambda\nu$.

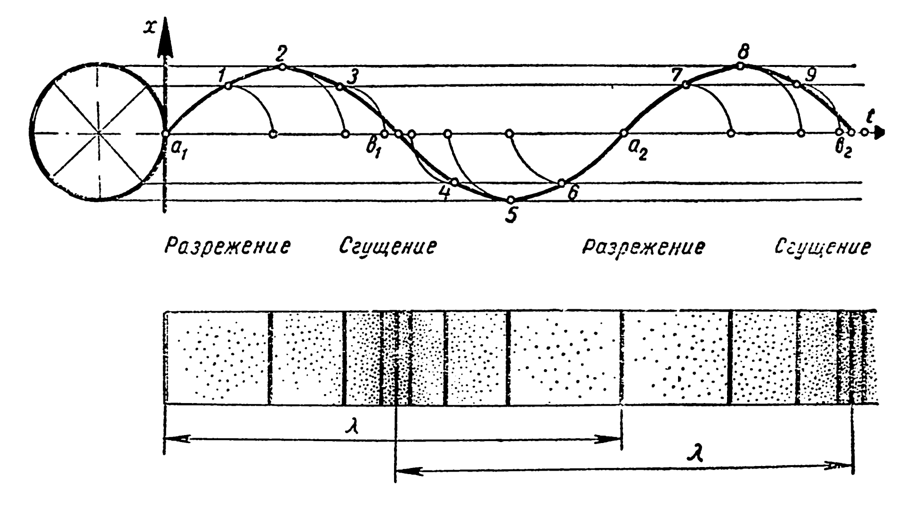



Рис. 90. График звуковой волны.

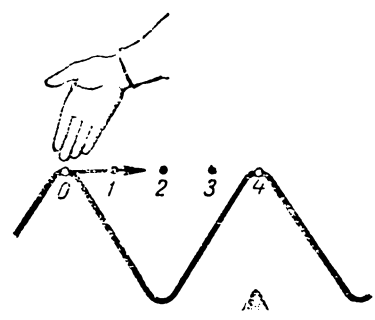




Рис. 91. К понятию фазовой скорости.

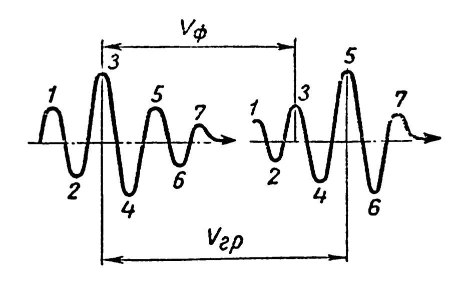



Рис. 92. К понятию групповой скорости.

По определению длины волны $c$ в этой формуле показывает скорость распространения какой-нибудь фазы колебательного движения, например максимума амплитуды, и потому называется фазовой скоростью. Наглядное представление о фазовой скорости облегчает рисунок 91. Допустим, мы отметили положение гребня *0* волны в какой-нибудь момент времени. При наблюдении за движением волны нам кажется, что изображенная синусоида перемещается как нечто целое, словно сдвигается в горизонтальном направлении изогнутая проволока. Отметка *0* при этом проходит последовательно через все соседние положения *1*, *2*, *3* и т. д., и наш палец следует за ней в направлении, указанном стрелкой. Вот скорость движения руки и будет фазовой скоростью. Мы могли бы выбрать любую другую точку на синусоиде (другую фазу) и следить за ее передвижением. Понятием фазовой скорости мы не раз будем пользоваться в дальнейшем.

Однако такое упрощенное представление о распространении звука является чистейшей идеализацией. Подобно тому как в механике понятие материальной точки или в оптике понятие луча являлось чисто математическим, так и фазовая скорость есть только математическое понятие. Как нельзя практически выделить строго монохроматический луч света (красный, зеленый, синий) с соответствующей ему строго определенной длиной волны, а всегда приходится иметь дело с пучком, представляющим собой смесь близко расположенных длин волн, так нельзя получить звуковой волны строго определенной частоты.

Кроме того, синусоида, бесконечно повторяющая фазы колебательного процесса, не несет никакой энергии и не передает никакого «сигнала», если она не модулирована: необходимо, чтобы были разрывы или изменения амплитуды. При распространении звука такая модуляция происходит всегда, так как всякий источник звука посылает не одну волну строго определенной частоты, а несколько, хоть немного отличающихся друг от друга, волн. Как известно, при этом происходит интерференция, приводящая к биениям: волна разбивается на отдельные участки — «пакеты» (рис. 92). Энергия концентрируется в ме-

стах наибольших амплитуд и может восприниматься ухом или другим приемником как определенный сигнал. При этом в некоторых случаях максимум перемещается по пакету со скоростью, отличной от фазовой (см. рис. 92).

Скорость сигнала или скорость звука есть скорость распространения подобных групп волн и потому называется групповой скоростью. С этой скоростью распространяется и энергия звука.

Для звуковых волн в воздухе и в воде групповая и фазовая скорости одинаковы. Это вызвано тем, что скорость звука, являясь скоростью распространения упругих деформаций среды, не зависит от частоты. Звуки любого тона распространяются одинаково (за исключением ультразвуков в некоторых газах). Если бы это было не так, то какой-нибудь аккорд, например *до*, *ми*, *соль*, на различных расстояниях звучал бы различно. В действительности же мы можем наслаждаться исполнением оркестром какого-нибудь музыкального произведения и вблизи и вдали от оркестра. Разница будет лишь в громкости.

Скорость звука не зависит от частоты колебаний. Выражаясь научным языком, мы можем сказать, что для звуковых волн не наблюдается дисперсии. Поэтому мы не будем далее оговаривать, о фазовой или групповой скорости идет речь, а будем говорить просто о скорости звука.

Итак, распространение звука в воздухе есть движение вызванных в воздухе упругих деформаций, а не перемещение воздушных масс, каким является, например, ветер. Движения же воздушных масс возможны с различными скоростями, точно так же и перемещения каких-либо тел относительно воздуха могут происходить со скоростями и меньшими и большими скорости звука. Но в зависимости от того, будет ли относительная скорость тела меньше или больше скорости звука, будут наблюдаться совершенно различные закономерности.

Познание закономерностей движения в воздухе позволило человеку осуществить свою заветную мечту об овладении воздушной стихией, о полетах в воздухе. История авиации полна драматизма, примеров безумной храбрости испытателей, упорного труда и точного расчета математиков, вдохновения и гениальных решений физиков и инженеров-конструкторов.

«Границы человечества» — так назвал немецкий поэт Гёте свое стихотворение, посвященное одному из первых полетов человека на воздушном шаре. Поэт выражает сомнение в возможности покорения стихии:

Ибо с богами
Меряться смертный
Да не дерзнет:
Если поднимется он и коснется
Теменем звезд,
Негде тогда опереться
Шатким подошвам,
И им играют
Тучи и ветры...

Действительно, беспомощным должен был чувствовать себя смельчак, поднявшийся на воздушном шаре и отдавший себя в полное распоряжение воздушных течений!

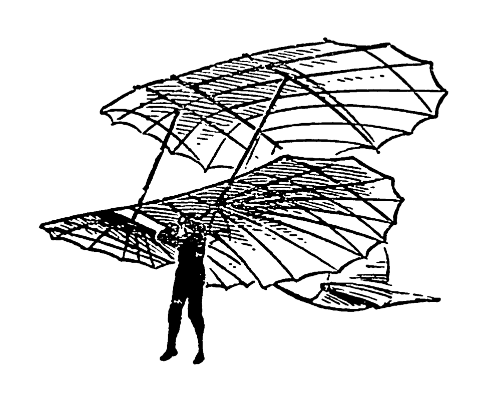


Рис. 93. Последний полет Лилиенталя.

Нельзя без волнения смотреть и на снимок, сделанный американским физиком Робертом Вудом, предпоследнего полета первого планериста — Отто Лилиенталя (1896 г.) (рис. 93), предпоследнего, потому что на следующий день повторение полета кончилось катастрофой.

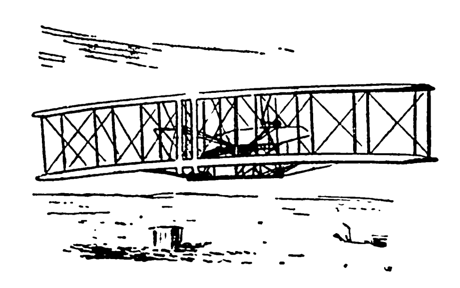


Рис. 94. Самолет братьев Райт.

В 1903 г. братья Вильбур и Орвиль Райт проводят испытания с первым моторным самолетом. Скорость всего 20 *км/ч*, дальность полета 260 *м*, а конструкция самолета! Хрупкий, похожий на большой коробчатый воздушный змей (рис. 94)*, самолет мало внушал доверия; и герои-энтузиасты зарождавшейся авиации не раз становились жертвами технической слабости своих машин. Так трагически погиб и Орвиль Райт осенью 1908 г.

В 1913 г. скорость самолетов достигла уже 100 *км/ч*. С чувством законной гордости мы можем отметить, что уже в это время русская инженерная мысль оказывала большое влияние на развитие авиации. Так, построенный Русско-Балтийским машиностроительным заводом самолет «Русский витязь» и следующий за ним «Илья Муромец» были первыми многомоторными самолетами. В этих самолетах впервые пассажиры и команда были помещены в закрытой кабине, а фюзеляж начал приобретать форму современных машин.

Несмотря на то что в то время еще не существовало правильного понимания целесообразной формы, какую должны иметь крыло и винт самолета, найденные опытным путем очертания свидетельствовали о высоком инженерном чутье русских конструкторов.

---

* Еще в 1881 г. А. Ф. Можайский получил патент на «воздухоплавательный снаряд», задуманный по принципу бумажного змея; к бортам деревянной лодки были прикреплены прямоугольные крылья, обтянутые желтым шелком, пропитанным лаком. В качестве двигателя были две двухцилиндровые паровые машины. Испытание, однако, не привело к положительным результатам.

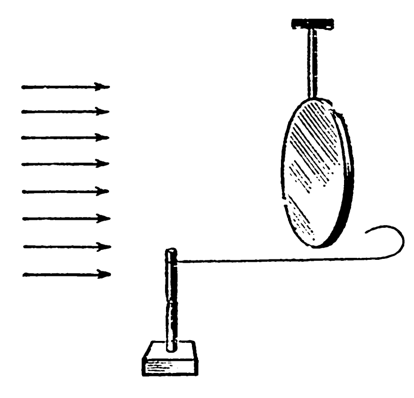


Рис. 95. Обнаружение вихрей при помощи нитки.

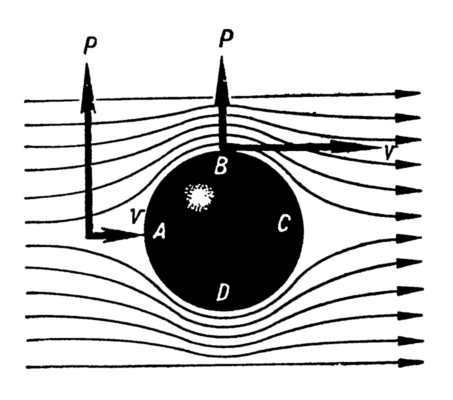



Рис. 96. Тело, движущееся в жидкости без вязкости.

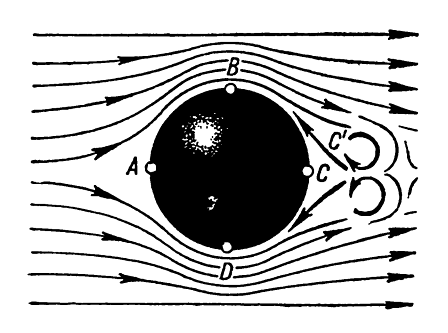



Рис. 97. Объяснение образования вихрей при наличии вязкости.

Две задачи вставали перед конструкторами — увеличить тяговую силу моторов и уменьшить сопротивление воздуха при полете самолета.

Опыт показывал, что увеличение мощности имеет предел, так как увеличение только одной мощности дает сравнительно медленное возрастание скорости: для увеличения скорости полета на 10% мощность надо было повысить на 33%, для увеличения скорости вдвое мощность надо было увеличить уже в 8 раз. Кроме того, с увеличением мощности возрастал вес моторов и самолета. Внимание конструкторов обратилось поэтому на вторую возможность увеличения скорости — на уменьшение сопротивления движению самолета со стороны воздуха.

Сопротивление воздуха движению тел обусловлено его вязкостью (внутренним трением). Если бы жидкость или газ совсем не обладали вязкостью, то движущееся в такой среде тело совершенно не встречало бы сопротивления («парадокс Эйлера»), струи обтекали бы тело совершенно свободно.

В среде, обладающей вязкостью, картина меняется. При движении, например, пластинки, поставленной поперек потока, она уже встречает сопротивление, вызванное разностью давлений на переднюю и заднюю стороны пластинки.

Чем вызвана эта разность давлений? Дело в том, что при некоторой скорости движения пластинки (или воздуха) сзади нее образуются вихри. Вы легко можете наблюдать это на опыте. Только вместо того, чтобы

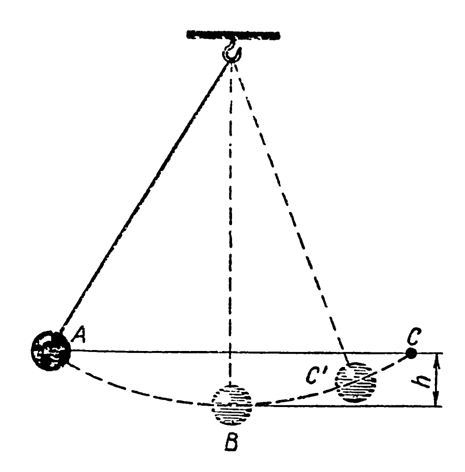



Рис. 98. Затухание колебаний маятника.

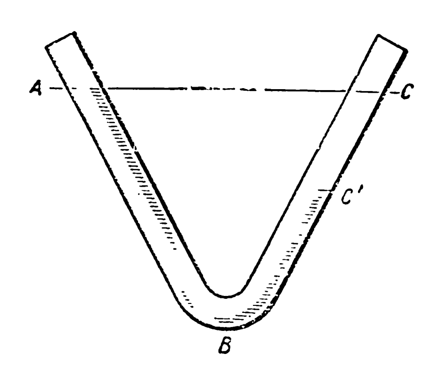



Рис. 99. Затухание колебаний жидкости в изогнутой трубке.

двигать пластинку, поставьте ее неподвижно навстречу набегающему потоку воздуха, например на сильном ветру. Рядом с пластинкой поместите привязанную к спице нитку и вы увидите, как нитка вытягивается вдоль потока воздуха, но при этом заворачивает за пластинку и трепещет (рис. 95).

Чтобы теоретически объяснить образование вихрей, рассмотрим цилиндр, помещенный в потоке воздуха (рис. 96). Если бы не было трения, то линии тока воздуха спокойно, без возмущений, обтекали бы цилиндр. При этом в местах над точками $B$ и $D$ линии тока сгущались бы, а это, как вам известно из физики, соответствует большей скорости течения, но меньшему давлению в потоке. Максимальные давления были бы в точках $A$ и $C$, однако силы давления уравновешивались бы, и тело не испытывало бы никакого сопротивления движению.

Иная картина создается в том случае, когда струи испытывают трение о стенки цилиндра и в прилегающих к ним слоях (рис. 97). В этом случае обтекающие цилиндр частицы воздуха вследствие трения теряют часть энергии и поэтому не достигают точки $C$. Они вынуждены еще раньше в некоторой точке $C_1$ повернуть назад к положению с минимумом потенциальной энергии (к точкам $B$ и $D$).

Это явление можно сравнить с затухающими вследствие трения колебаниями маятника (рис. 98), когда он, не достигая в правой половине пути высоты, равной той, с которой он упал слева, поворачивает назад с уменьшенной амплитудой, или с аналогичными же колебаниями жидкости в изогнутой коленом трубке (рис. 99).

Встречаясь с параллельным ему течением слоев, расположенных дальше от цилиндра, это обратное течение приводит к обра-

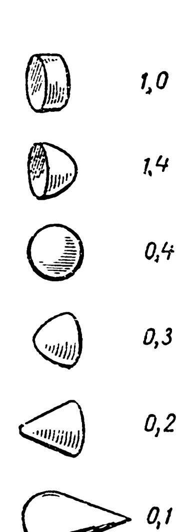


Рис. 100.

зованию вихря (вспомните вращение, вызываемое парой сил). Течение уносит эти вихри, а вместо них возникают новые.

Таким образом, образование вихрей за движущимся телом обязано внутреннему трению в потоке и связано с потерей энергии. Потеря же энергии приводит к тому, что давление перед движущимся телом оказывается больше, чем за ним. Результирующее давление направлено против движения тела и представляет собой так называемое лобовое сопротивление движению.

Величина лобового сопротивления зависит, кроме скорости, и от формы тела. В этом можно убедиться экспериментально, направляя поток воздуха на тела различной формы, но имеющие одинаковую площадь поперечного сечения. Рисунок 100 показывает сравнительную величину лобового сопротивления по отношению к сопротивлению круглой пластинки, принятому за единицу. Как видите, тело сигарообразной формы имеет наименьшее сопротивление. Такую форму называют обтекаемой. Придавая телам — автомобилям, самолетам, подводным лодкам — легкообтекаемую форму, удается свести к минимуму вихреобразование и, следовательно, уменьшить потери мощности двигателя на преодоление лобового сопротивления. Подчеркиваем, что главную причину лобового сопротивления надо искать в вихреобразовании, зависящем от хвостовой, а не передней части самолета, автомобиля и пр. Однако это, как вы узнаете дальше, справедливо лишь для скоростей, меньших скорости звука.

Не всегда вихри надо рассматривать как явление нежелательное, как причину сопротивления, затрудняющего движение тела. Согласно теории полета самолета, разработанной нашим замечательным ученым Николаем Егоровичем Жуковским (1847—1921), образованию вихревого движения (циркуляции) вокруг крыла самолета обязано возникновение подъемной силы, действующей на крылья самолета.

Крылу самолета придают особую форму, способствующую образованию циркуляции (рис. 101). С задней кромки крыла все время срываются вихри с вращением против часовой стрелки. Вихрь уносит с собой некоторый момент импульса, и потому вихревое движение, возникающее вокруг крыла, согласно закону сохранения момента импульса должно быть направлено по часовой стрелке. Этот закон вращательного движения аналогичен закону сохранения импульса для поступательного движения: когда человек спрыгивает с лодки на берег, лодка приходит в движение, противоположное направлению прыжка, и получает импульс, равный импульсу спрыгнувшего человека. В примере с крылом самолета мы имеем дело не с

поступательным, а с вращательным движением.

Образующаяся вокруг крыла циркуляция направлена в нижней части крыла против потока и вызывает уменьшение скорости потока, а значит, увеличение давления; в верхней же части, наоборот, скорость потока увеличивается, а давление уменьшается. Разность давлений снизу и сверху крыла приводит к образованию подъемной силы. Проделайте простой опыт, который лучше поможет вам понять это. Дуйте вдоль полоски бумаги, держа ее за один конец. В потоке над бумагой создается уменьшенное давление сравнительно с давлением на нижнюю сторону, и свисавшая раньше полоска выпрямится под действием подъемной силы (рис. 102).

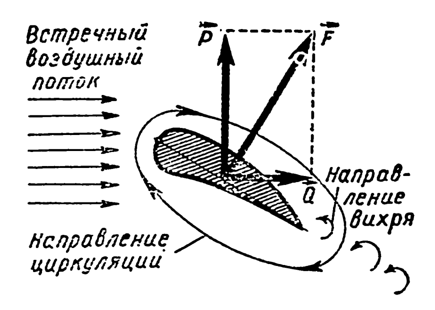



Рис. 101. Профиль крыла самолета и возникновение циркуляции.

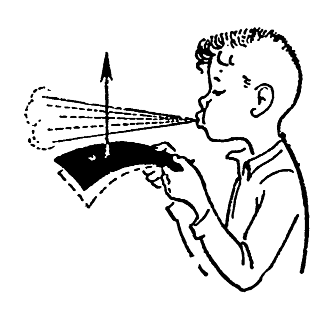


Рис. 102. Струя воздуха уменьшает давление над листом бумаги.

При анализе динамики полета самолета приходится обращать внимание не только на обтекаемую форму фюзеляжа и специальную форму крыла, но и на устройство винта («пропеллера»). Сила тяги, создаваемая винтом при вращении его мотором, вызывается теми же явлениями, с которыми мы познакомились при рассмотрении роли крыла. Рассмотрим это несколько подробнее. Вырежем мысленно из лопасти крыла поясок, ограниченный поперечными сечениями *1* и *2*. Как показано на рисунке 103, профиль этого элемента аналогичен профилю крыла самолета. Поэтому подобно подъемной силе, действующей вследствие возникновения циркуляции на крыло, в данном случае возникает сила $\vec{R}$ со стороны окружающего воздуха, действующая

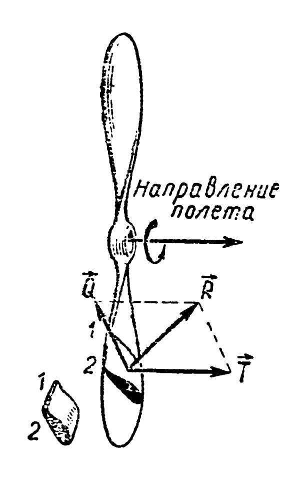



Рис. 103. Объяснение принципа действия винта самолета.

на вращающуюся лопасть винта. Разложение этой силы на две составляющие дает силу тяги $\vec{T}$ и силу $\vec{Q}$, аналогичную лобовому сопротивлению и препятствующую вращению винта. Часть мощности мотора затрачивается на то, чтобы вращать винт, преодолевая эту силу сопротивления. Другая часть мощности создает силу тяги, которая и движет самолет.

Чем больше скорость полета, тем большая часть мощности расходуется на преодоление сопротивления и меньшая часть остается на создание полезной силы тяги. Особенно резко возрастает сопротивление при приближении скорости полета к скорости звука — мотор с воздушным винтом почти перестает тянуть, тем самым ставится предел дальнейшему увеличению скорости моторного самолета.

Поршневые двигатели внутреннего сгорания при больших скоростях уже не обеспечивают необходимую силу тяги. Газовые турбины дали возможность еще несколько увеличить скорость полета. В турбовинтовых советских лайнерах сила тяги создается не только винтом, но и силой реакции струи газов, вылетающих из сопла турбин. В турбореактивных самолетах винт совершенно отсутствует, и движение таких самолетов совершается за счет реактивной силы. Таким образом удается достичь скорости звука и даже превзойти ее. Но здесь строители самолетов столкнулись с совершенно новым явлением.

Вы стоите на берегу озера и бросаете камни в воду. От каждого камня кругами расходятся волны. Распространение волны хорошо объясняется на основании принципа Гюйгенса — Френеля: каждая точка, до которой распространилось колебание, сама становится центром колебания и от нее начинают расходиться новые волны (рис. 104). Поверхность, огибающая такие вторичные волны, образует новый фронт волны, точки которого порождают в свою очередь другие элементарные волны, и процесс распространения колебательного движения продолжается дальше, потому что в боковых направлениях элементарные, вторичные волны интерферируют и погашают друг друга и лишь в первоначальном направлении идет распространение колебательного движения. Этот принцип лежит в основе распространения волн любой природы: и звуковых, и световых, и кругов на воде.

Теперь, допустим, вы идете вдоль берега и продолжаете через равные промежутки времени свою забаву. Если при этом вы идете медленнее, чем распространяется волна, то каждый следующий камень падает внутри опередившей вас волны (рис. 105).

Наконец, представьте себе, что вы движетесь быстрее распространения волны. Границы каждой волны описаны прежними радиусами, но центры окружностей удалены друг от друга на большее расстояние, чем расстояние, проходимое волной. — вы опережаете волны, и от каждого камня, брошенного

вами, новая волна пересекает предыдущую, вырываясь вперед (рис. 106). Фронт всего волнового движения, вызванного вами на воде, принимает клинообразную форму, тем более острую, чем больше ваша скорость по сравнению со скоростью распространения волн.

Такую же картину можно наблюдать на поверхности воды за быстро идущим катером. И носовая часть, и корма при своем движении со скоростью, большей скорости распространения волн на поверхности воды, образуют за собой клинообразный след. Образуются следы и от других точек катера, но вследствие интерференции картина размазывается и резко заметны главным образом головная и хвостовая волны да еще вихреобразная дорожка позади катера.

В воздухе при полете пули, самолета со скоростью, превышающей скорость распространения упругих деформаций, т. е. превышающей скорость звука, должно возникать такое же явление, только тянущиеся за летящим телом волны будут распространяться в трехмерном пространстве и будут иметь форму не плоского клина, а конуса. Рисунки 107, *а* и *б*, заимствованные из книги австрийского физика Маха*, представляют собой: *а* — схематическое изображение и *б* —фотографию, сделанную при вспышке электрической иск-

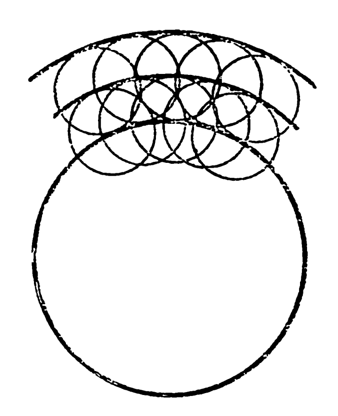


Рис. 104. Образование и распространение волн по принципу Гюйгенса — Френеля.

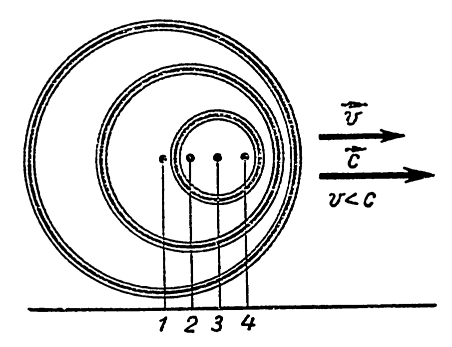



Рис. 105. Волны при движении со скоростью меньшей, чем скорость их распространения.

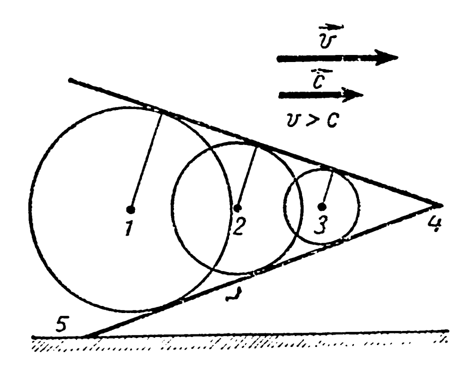



Рис. 106. Волны при движении тела со скоростью большей, чем скорость их распространения.

---

* Эрнст Мах. Популярно-научные очерки. СПб., 1909.

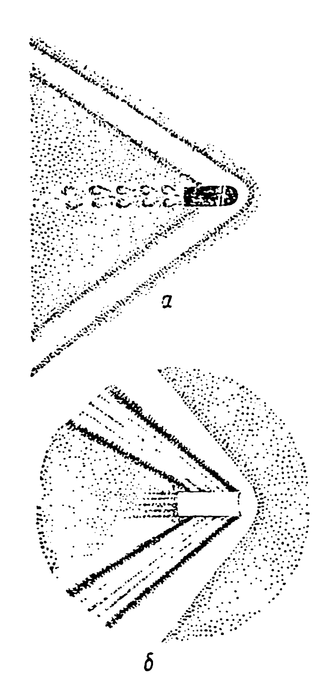


Рис. 107. Схема и фотография волн Маха.

ры, летящей пули из ружья Манлихера. «Светлая, напоминающая гиперболу дуга у верхушки пули, — пишет Мах, — есть волна сгущенного воздуха, вполне аналогичная волне у носа корабля. Волна становится видимой, подобно тому как становится видимой при проектировании на экран нагретая оболочка воздуха, окружающая пламя свечи. Медленно движущаяся лодка не вызывает таких волн впереди себя; чтобы эти волны образовались, лодка должна двигаться со скоростью, превышающей скорость распространения водяных волн. Так и впереди пули нет волн сгущенного воздуха, пока скорость ее полета остается меньше скорости распространения звука».

Когда в погоне за все большей и большей скоростью полета строители самолетов столкнулись со все возрастающим сопротивлением воздуха, они вынуждены были обратить внимание на явление, которое только что было описано нами и которое было уже знакомо артиллеристам. Связь наблюдавшегося возрастания сопротивления со скоростью звука естественно было выразить количественно. Отношение скорости полета самолета к скорости звука (1224 *км/ч*) назвали в честь австрийского физика числом Маха, сокращенно обозначая единицу его буквой $M$. Таким образом, скорость движения, равная скорости звука, будет обозначена $1M$, скорость, вдвое большая скорости звука, равна $2M$, и т. д. В настоящее время достигнуты скорости, превышающие $2M$, и усилия изобретателей и конструкторов направлены на достижение скорости в $3M$. Если бы самолет летел с такой скоростью у поверхности Земли, то он облетел бы земной шар примерно за 10 *ч*. С какими это связано затруднениями и почему подобные скорости пока невозможны, вы сейчас узнаете.

Если самолет летит со скоростью, меньшей скорости звука ($M < 1$), то упругие возмущения, вызываемые им в воздухе, опережают самолет. Наблюдатель, находящийся на Земле, услышит звук от приближающегося самолета раньше, чем самолет окажется над его головой. Воздушные волны опережают самолет и успевают, так сказать, дать ему дорогу.

Если самолет летит со скоростью звука (рис. 108), то возмущения уже не могут его опережать, так как распространяются с той же скоростью. Наблюдатель на Земле услышит самолет как раз в тот момент, когда он над ним пролетает. Воздух

перед самолетом не возмущен и только в непосредственной близости он оттесняется в стороны. Если же самолет движется быстрее звука, то он обгоняет возмущения воздуха. Наблюдатель услышит самолет тогда, когда последний уже далеко впереди. Но что он услышит? Быть может, многим читателям приходилось присутствовать на авиационных парадах в Тушине и они помнят напоминающие раскаты грома удары, следующие через некоторое время после того, как промчался сверхзвуковой самолет? Только после удара, и притом, если самолет пролетает не на очень большой высоте, становится слышен обычный шум полета этого современного чуда техники. Какова причина этих громовых ударов? Может быть, они происходят в тот момент, когда самолет прорывается через так называемый «звуковой барьер», т. е. через ту стену уплотненного воздуха, какую мы видим на рисунке 108 в головной части самолета? Ничего подобного! Как ни заманчиво подобное объяснение, оно неверно. Истинная причина такова: на границе фронта головной волны создается резкий скачок уплотнения. Рисунок 109 показывает распределение давления, вызываемого такой волной. Подобные же скачки давления возникают при взрывах или при грозовых разрядах. Они распространяются со скоростью, большей скорости звука, и называются ударными волнами.

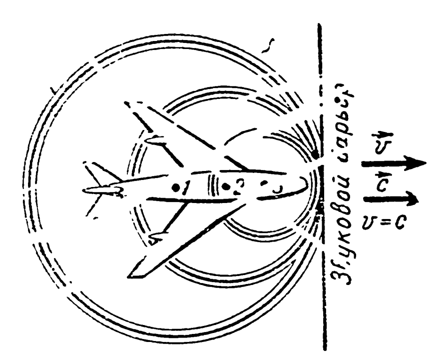


Рис. 108. У звукового барьера.

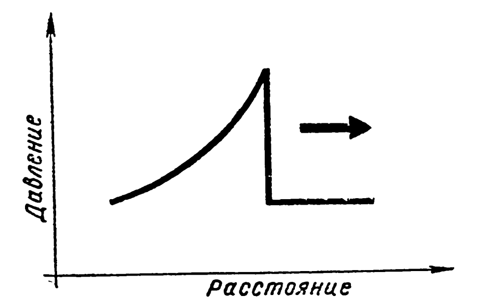
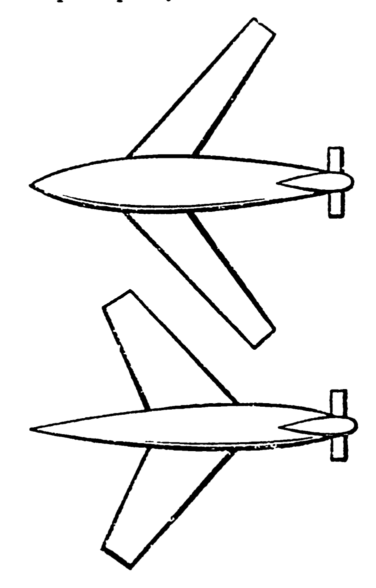


Рис. 109. Скачок уплотнения при сверхзвуковом полете.


Рис. 110. Форма крыльев сверхзвукового самолета.

Ударные волны, возникающие при полетах со скоростью, большей скорости звука, распространяются со скоростью самого самолета. До наблюдателя, находящегося правее точки пересечения линии Маха с землей (точка *5* на рисунке 106), ударная волна дойдет, когда самолет будет уже далеко. Резкий, почти мгновенный перепад давления воспринимается как громкий удар с раскатами эха. После удара наблюдатель окажется внутри конуса Маха и до него будут доходить обычные звуковые волны, производимые работой двигателя и трением самолета о воздух.

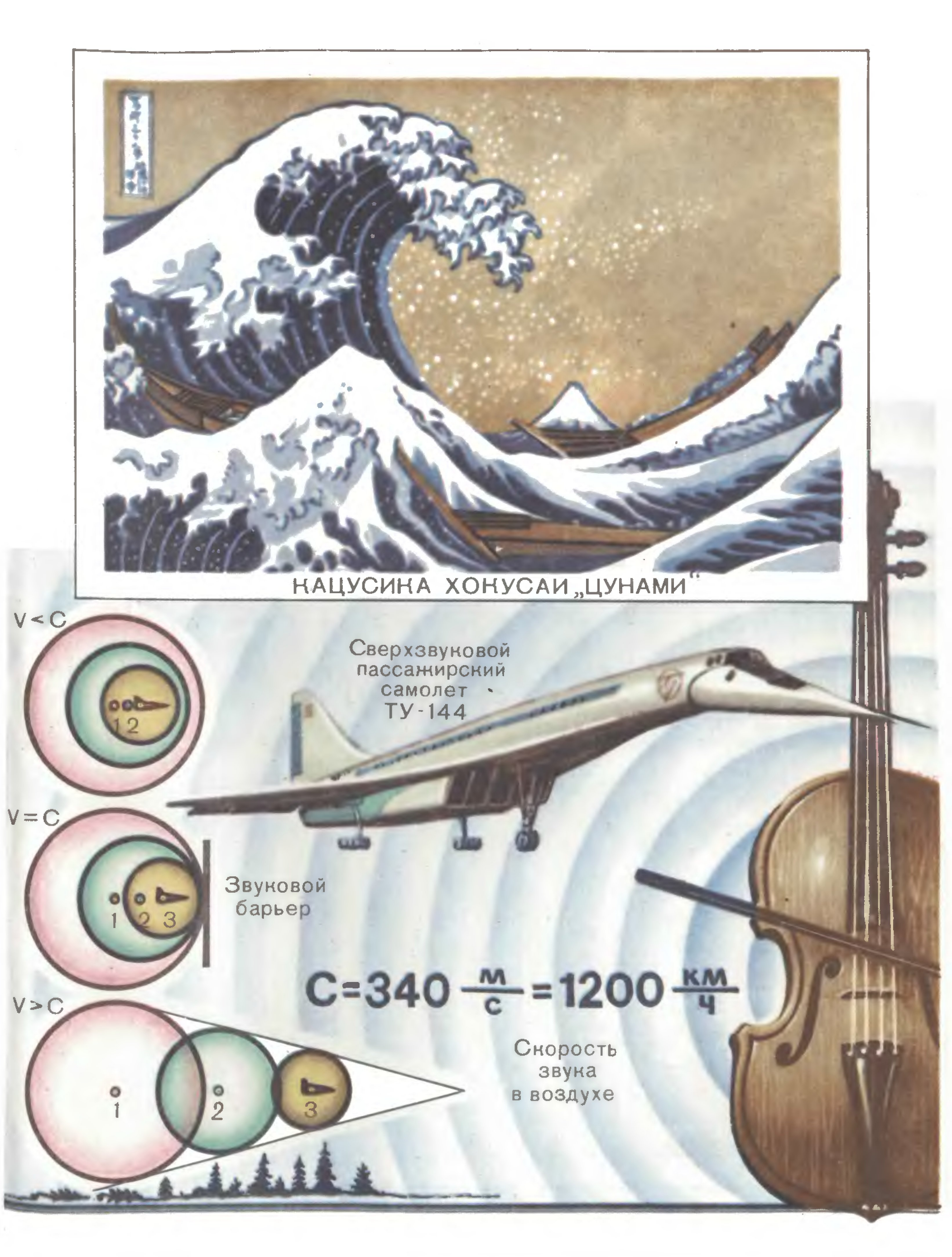
Ударные волны несут с собой энергию огромной мощности. При небольшой высоте полета ударной волной могут быть разрушены даже здания, срезаны телеграфные столбы, вырваны деревья. Чтобы избежать подобных разрушений, подъем сверхзвукового самолета производят при дозвуковых скоростях и лишь с высоты примерно 12 000 *м* переходят на скорость $M = 1$, а при достижении 18 000 *м* — на $M = 2$. Ударные волны, пришедшие с высоты 20 000 — 25 000 *м*, уже не вызовут разрушений даже при скорости $M = 3$.

Нечто аналогичное ударным волнам можно найти и в штормовых волнах во время прибоя. Когда волна идет к берегу, она замедляется; позади же, где глубина больше, волна движется быстрее и, набегая на идущую впереди, искажает ее форму: волна перегибается через себя, гребень волны срывается и рассыпается в мельчайшие брызги пены. Математический анализ явления весьма сложен.

Морские ударные волны могут достигать чудовищной силы, а высота взброса — нескольких метров. Академик В. В. Шулейкин в своих «Очерках по физике моря» приводит пример волн, достигавших высоты 43 *м*, а о силе удара свидетельствует произведенное волной разрушение скалы «Монах» в Симеизе, расколовшейся на три куска во время мощного шторма 19 января 1931 г.

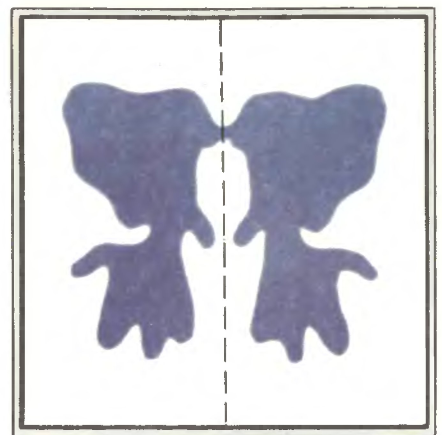
Катастрофы с первыми сверхзвуковыми самолетами заставили конструкторов изменить и форму самолета. При полетах со скоростью, большей скорости звука, волновое сопротивление зависит уже не от задней, а от передней части самолета. Поэтому передняя часть сверхзвуковых самолетов делается заостренной. Острыми делаются и кромки тонких крыльев, а сами крылья отгибаются назад подобно оперению летящей стрелы (рис. 110). Всякие неровности на крыльях или фюзеляже могут служить причиной появления местных скачков уплотнения воздуха, что увеличило бы сопротивление. Чтобы избежать этого, при выполнении деталей самолета стремятся удалить все неровности (заклепки и пр.) и тщательно отполировать всю поверхность самолета.

Проблема движения со скоростью, большей скорости звука, как мы видели, связана с учетом сжимаемости воздуха (при скоростях, далеких от звуковых, воздух практически считается несжимаемым, как и вода), с образованием скачков уплотнения

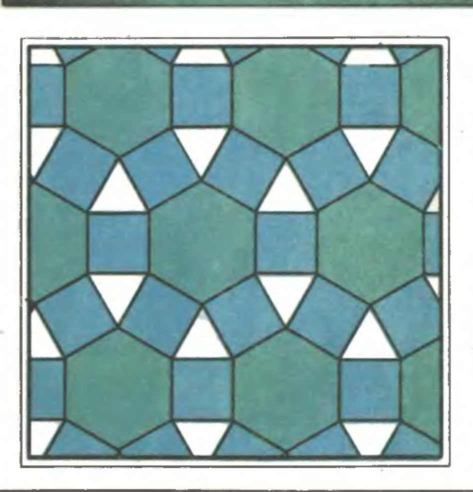


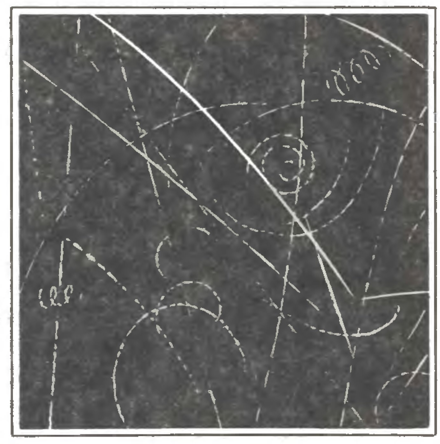

**К статье «Быстрее звука».**





НИ ГЕЛИЙ НЕОН





**К статье «Законы сохранения как отражение симметрии».**

и ударных волн. Это обстоятельство и вызвало существенные изменения в конструкции сверхзвуковых самолетов.

Сжатие газа сопровождается повышением температуры. Поэтому дальнейшее увеличение скорости за пределы 3 *М* выдвигает новые технические трудности. Строители самолетов стоят теперь перед «тепловым барьером». Уже при $v = 3$ *М* температура оболочки самолета повышается на 300 °С. Жаростойкие материалы (титан, нержавеющая сталь), специальная система охлаждения — вот меры, какие применяются для предупреждения перегрева.

Решение задачи надо искать в полетах на больших высотах, в среде очень разреженной атмосферы. Но тогда уже мы отходим от принципов аэродинамики, на которых зиждется идея самолета, и переходим к ракетной технике и космонавтике.

## БЫСТРЕЕ СВЕТА

### (ЭФФЕКТ ЧЕРЕНКОВА)

Эта беседа — непосредственное продолжение предыдущей беседы «Быстрее звука». Но разве сама постановка вопроса не противоречит основному постулату теории относительности, согласно которому скорость света — это предельная, максимальная скорость и никакое тело не может двигаться со скоростью, большей скорости света в пустоте, т. е. большей 300 000 *км/сек*? Но... читайте дальше.

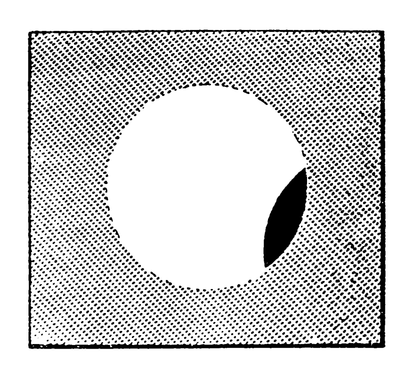
Однако уточним сначала, что понимать под скоростью света и каким образом ученые измерили ее.

Вам, вероятно, попадались объявления в газетах:

«...августа произойдет частное затмение Солнца. Начало затмения..., конец...» Запасшись закопченным стеклом, вы в назначенный срок подходите к окну или выходите на улицу и, защитив глаза от ослепляющего действия лучей, с нетерпением ожидаете начала предсказанного события. Поразительно! Секунда в секунду начинается затмение: справа на сияющий на безоблачном небе диск Солнца надвигается темное пятно и форма диска становится все более и более ущербленной (рис. 111).

В редких случаях удается быть свидетелем того, как проходящая между Солнцем и Землей Луна полностью закрывает диск Солнца. На несколько минут день превращается в ночь: на небе вспыхивают звезды, неразличимые в блеске яркого дня. Наблюдать солнечное затмение могут лишь те счастливцы, которые окажутся в полосе тени Луны, ложащейся на поверхность земного шара.

Чаще удается наблюдать затмение Луны, однако оно менее эффектно, чем солнечное затмение. Лунное затмение наступает


Рис. 111. Начало затмения Солнца.

от того, что тень Земли падает на Луну, когда, обходя вокруг Земли, Луна окажется на прямой линии, соединяющей Землю и Солнце.

Астрономы еще в глубокой древности научились предсказывать затмения.

Луна — естественный спутник Земли. Среди планет солнечной системы известны другие планеты, имеющие по нескольку лун-спутников. С ними тоже происходят затмения. И вот, датскому астроному Ремеру в 1675 г. пришла мысль использовать наблюдения затмений для вычисления скорости света. Идея очень проста. Рассматривая таблицу последовательных затмений одного из спутников планеты Юпитер, Ремер заметил периодическое расхождение фактических, наблюдавшихся им затмений со сроками, предсказанными вычислением. Бросалась в глаза такая закономерность: после ряда удачных совпадений начиналось запаздывание затмения, причем опоздание сначала все увеличивалось от затмения к затмению, достигало максимальной величины, а потом расхождение сроков снова уменьшалось, пока не наступало снова хорошее совпадение теории и практики. Максимальное запаздывание наступления затмения от предсказанного срока оказалось 1000 *сек*. Ремер объяснял эти запаздывания тем, что за время движения Земли вокруг Солнца расстояние от Земли до Юпитера изменялось и становилось наибольшим, когда обе планеты оказывались в противоположных точках по отношению к Солнцу (рис. 112). Тогда свет от Юпитера и весть о начале затмения спутника должны были прийти на Землю позже, так как планеты разделяло расстояние, большее на величину диаметра земной орбиты (примерно на 300 000 000 *км*). Простой расчет дает тогда для скорости света значение:

$$c = \frac{300\,000\,000\ км}{1000\ сек} =$$

$$= 300\,000\ км/сек.$$

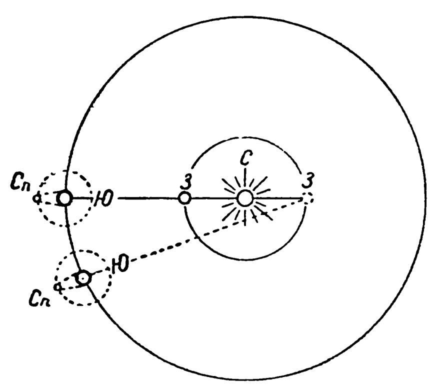


Рис. 112. Определение скорости света Ремером.

Во времена Ремера расстояние от Земли до Солнца было

известно с меньшей точностью, и он получил для скорости света меньшее число — около 40 000 миль в секунду (215 000 *км/сек*).

Впоследствии скорость света определялась много раз различными учеными. Остроумный способ для измерения скорости света на небольших сравнительно расстояниях (8,6 *км*) предложил французский физик Физо в 1849 г. Схема опыта показана на рисунке 113. Здесь $n$ — плоское зеркало, $m$ — прозрачная стеклянная пластинка, наклоненная под углом 45° к оси трубы. Свет от источника $S$, пройдя через систему линз, направляется параллельным пучком на расстояние 8,6 *км* и, отразившись от плоского зеркала, возвращается к наблюдателю. На пути света в точке $F$ (фокус) помещено вращающееся зубчатое колесо. Глаз наблюдателя видит в точке $F$ изображение светящейся точки $S$, если колесо находится в таком положении, что фокус $F$ попадает в промежуток между зубьями. Если же на пути света встанет непрозрачный зубец, то наблюдатель ничего не увидит (опыт производился в темноте). При медленном вращении колеса светящаяся точка то открывается, то закрывается зубцами. Если же колесо вращать быстро и так, что светящаяся точка будет появляться чаще чем 7 раз в секунду, то по свойству нашего глаза впечатление света будет непрерывным. Однако при еще большем увеличении скорости вращения наступит такой момент, что, несмотря на огромную скорость света, пучок лучей, пройдя двойное расстояние от $F$ до $n$ (туда и обратно), будет попадать на непрозрачный зубец. Тогда наблюдатель не увидит светящейся точки.

В опытах Физо исчезновение света происходило, когда колесо делало 12,6 *об/сек*. Колесо имело 720 зубцов. Читатель может рассчитать, какая скорость света получалась по Физо (уточненное расстояние $Fn = 8633$ *м*).

При увеличении скорости колеса вдвое свет опять появлялся, при тройной скорости свет снова исчезал и т. д. Ясно, что,

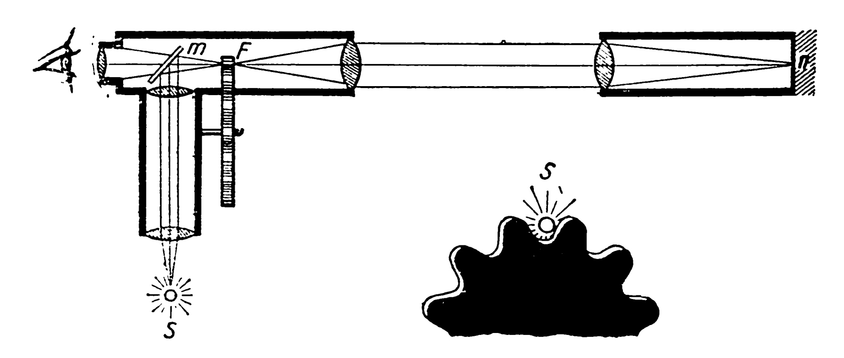



Рис. 113. Определение скорости света Физо.

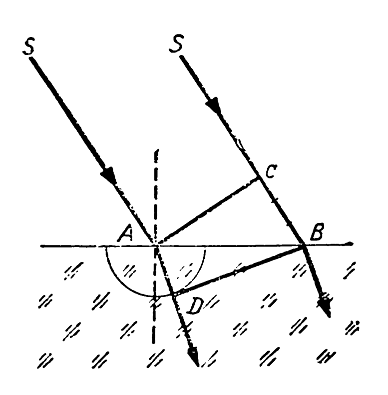



Рис. 114. Объяснение преломления света по принципу Гюйгенса—Френеля.

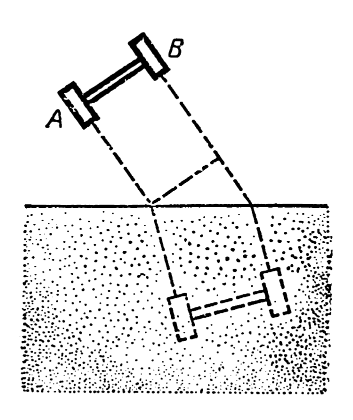



Рис. 115. Модельный опыт по преломлению.

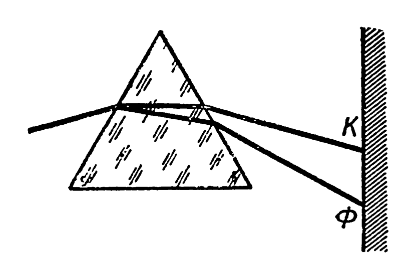



Рис. 116. Дисперсия света.

зная скорость вращения, число зубцов и расстояние до отражающего зеркала, можно вычислить скорость света.

Более сложный способ с применением вращающихся зеркал позволил в том же году другому французскому физику—Фуко определить скорость света уже на расстоянии всего 4 *м*. Этим же способом удалось убедиться, что в воде скорость света примерно в 1,3 раза меньше, чем в воздухе.

Новейший метод измерения скорости света американским физиком Майкельсоном (1929 г.) описан в любом школьном учебнике физики, и мы его не приводим.

Самое главное, на что следует обратить внимание, — это то, что все опыты по определению скорости света связаны с прерыванием света, т. е. с наличием начала и конца сигнала. Следовательно, как это было разъяснено в предыдущей беседе, измерение скорости света дает нам групповую скорость—скорость движения сложного комплекса волн, мало отличающихся по частоте.

Выделяя из этого комплекса монохроматический луч (это возможно только теоретически) и говоря о движении какой-либо фазы, например гребня волны, мы можем выделить и так называемую фазовую скорость.

В вакууме волны любой частоты распространяются с одинаковой скоростью, и потому групповая и фазовая скорости света в вакууме совпадают. 300 000 *км/сек* — это и групповая и фазовая скорость света в вакууме.

Иное дело, когда свет проходит через какую-нибудь среду: воду, стекло и т. д. В этом случае фазовая скорость зависит от частоты

колебания. Зависимость фазовой скорости света от частоты, как мы говорили в предыдущей беседе, называется дисперсией. Наличие дисперсии приводит, как известно, к разложению света на цвета, к образованию спектра при прохождении света через призму.

Используя принцип Гюйгенса — Френеля, легко объяснить факт преломления. Из двух лучей *SA* и *SB* (рис. 114) первым достигает поверхности раздела двух сред (например, вакуум — стекло) луч *SA*. Всякая точка, до которой доходит волна света, сама становится центром колебаний, и за то время, пока луч *SB* пройдет в вакууме расстояние *CB* до стекла, в стекле от точки *A* разойдется волна, но на расстояние *AD*, меньшее *CB*. Легко иллюстрировать это на простом опыте. Лист фанеры разделите на две части, из которых одну оставьте гладкой, а другую сделайте шероховатой, намазав, например, клеем и посыпав тонким слоем песка (рис. 115). Если теперь покатить под углом, меньшим 90°, к границе раздела каточек, сделанный из двух колесиков, надетых на ось, то можно увидеть, как, переходя с гладкой поверхности на шероховатую, каточек изменит свое направление, подобно преломленным лучам света. Колесо *A* движется по шероховатой поверхности медленнее, чем колесо *B* по гладкой.

Таким образом, преломление света при наклонном падении лучей вызвано различием скоростей света в разных средах. Чем больше различие в скоростях, тем сильнее преломление. Отношение скорости света в вакууме к скорости света в вещественной среде называется показателем преломления *n*.

При распространении света в вещественной среде наблюдается дисперсия, так как скорость распространения различна для разных цветов. Фиолетовые лучи преломляются сильнее, чем красные, или, другими словами, показатель преломления у них больше, так как они имеют большую частоту. Дисперсия и лежит в основе разложения белого света на цвета (рис. 116).

Напомним, что луч света — понятие геометрическое, идеализированное. Выведенный из рассмотрения хода лучей показатель преломления связан с понятием не групповой, а фазовой скорости. Фазовая скорость света в веществе в результате дисперсии может быть и больше и меньше скорости света в вакууме. Групповая же скорость, скорость сигнала, несущего энергию, никогда не может превысить скорость света в вакууме. Ведь скорость материального объекта (в данном случае «пакета волн») не может быть больше скорости света в вакууме. Это следует из формулы теории относительности для массы движущегося тела:

$$m = \frac{m_0}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}}.$$

Если скорость материального объекта равна скорости света в вакууме, т. е. $v = c$, то знаменатель в этой формуле обращается в нуль, а масса становится бесконечно большой.

Перейдем теперь к описанию одного замечательного явления, которое известно под названием эффекта Вавилова — Черенкова и которое связано с движением электронов со скоростью, большей скорости света (речь идет, конечно, о фазовой скорости).

Еще в 1932—1934 гг., работая под руководством С. И. Вавилова над изучением явления люминесценции, П. А. Черенков обнаружил, что под действием $\gamma$-лучей возникает слабое свечение, которое нельзя было объяснить люминесценцией. Но сначала вспомним, что такое люминесценция. Люминесценцией называется холодное свечение, вызванное не повышением температуры, не накаливанием, а различными возбудителями — механическими, химическими, освещением видимыми и невидимыми лучами (ультрафиолетовыми, рентгеновскими и гамма-лучами). Попробуйте в темноте колоть куски сахара, вы увидите вспышки света, вызванные механическим разрушением кристаллов. Вам, конечно, знакомо свечение древесных гнилушек, вызванное химическими процессами окисления. В физическом кабинете вам показывали свечение минералов в вакуумных трубках под ударами электронов. Вы любовались своеобразным салютом в спинтарископе, когда альфа-частицы радиоактивного вещества попадали на экранчик, покрытый сернистым цинком. Все это примеры люминесценции. Люминесценция связана с переходом атомов, возбужденных под влиянием какого-либо из перечисленных факторов, в нормальное состояние. Длительность возбужденного состояния обычно невелика, около $10^{-8}$ *сек*.

Задачей работавших под руководством С. И. Вавилова ученых было установить закономерности этого, тогда еще мало изученного явления — влияние температуры, различных примесей к исследуемому веществу, концентрации, — установить длительность свечения, цветность и т. д. В процессе этих исследований Черенков натолкнулся на таинственное явление, когда веществом, светившимся под действием гамма-лучей радия, оказалась чистая вода, которая до того способностью к люминесценции не обладала. Удивление вызывало и то, что свечение распространялось не во все стороны, как, например, от зажженной свечи, а концентрировалось в виде узкого конического пучка вдоль направления гамма-лучей. Угол при вершине конуса зависел от показателя преломления испытуемой жидкости (проверялись различные растворы, спирты, четыреххлористый углерод и др.). Чем большим был показатель преломления, тем большим оказывалось раскрытие конуса.

Академик Вавилов высказал предположение, что происхождение свечения объясняется движением электронов, освобождающихся из атомов вещества под влиянием гамма-лучей. Элек-

троны ударом возбуждают атомы вещества, которые через миллионные доли секунды излучают свет. Действительно, под влиянием магнитного поля свечение отклонялось подобно тому, как отклоняется поток катодных лучей в вакуумной трубке. Постоянство свечения, несмотря на попытки воздействовать на него различными факторами, тоже подтверждало, что в основе его должны быть одни и те же возбудители (электроны).

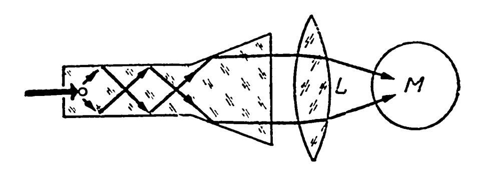



Рис. 117. Счетчик Черенкова.

Окончательное разъяснение природы свечения Черенкова дали советские академики И. Е. Тамм и И. М. Франк, которым совместно с Черенковым в 1958 г. была присуждена Нобелевская премия по физике «за открытие и разъяснение эффекта Черенкова».

Тамм и Франк показали, что свечение Черенкова обусловлено возникновением ударных волн, сопровождающих движение электронов со скоростью, большей фазовой скорости света $\frac{c}{n}$ в веществе. Такие волны, как вы уже знаете из предыдущей беседы, возникают всегда при движении тела со скоростью, большей скорости распространения возмущений в среде. В форме конической головной волны они следуют за быстро идущим катером, образуются при полете пули со скоростью, превышающей скорость звука в воздухе. При этом пуля звучит, «поет», хотя и не находится в колебательном состоянии. Так «поют» и летящие со сверхсветовой скоростью электроны.

Вы можете наблюдать явление, если посетите павильон атомной энергии на Всесоюзной выставке достижений народного хозяйства в Москве.

В настоящее время из объекта исследования эффект Черенкова превратился в инструмент исследования в различных областях современной физики. Разработанные на основе этого эффекта счетчики (счетчики Черенкова) с успехом применяются для регистрации быстрых заряженных частиц: протонов, мезонов в космических лучах. При помощи этих счетчиков были открыты новые частицы — антипротон и антинейтрон.

На рисунке 117 показана схема счетчика Черенкова. Существенной частью счетчика является цилиндр из плексигласа или другого ве-

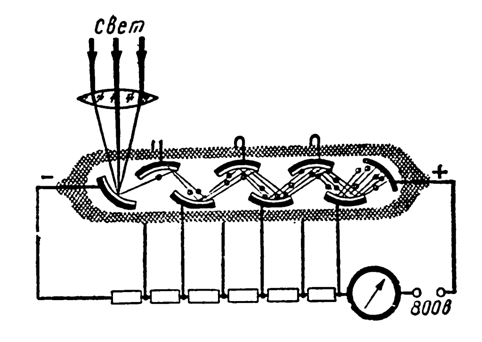



Рис. 118. Фотоумножитель.

щества с большим показателем преломления. Влетающая в счетчик частица движется со скоростью, большей $\frac{c}{n}$. В этом случае, как мы знаем, возникает головная волна, которая испытывает в цилиндре неоднократное полное внутреннее отражение и при помощи линзы $L$ направляется в электронный фотоумножитель $M$. Созданный в умножителе импульс может быть зарегистрирован счетным прибором.

Поскольку до сих пор мы не имели случая познакомить читателей с таким важным современным прибором, как фотоумножитель, приводим его схему (рис. 118). Пучок света, собранный линзой, падает на вогнутый фотокатод (цезиево покрытие) и вызывает эмиссию электронов, поток которых, отражаясь от ряда дополнительных фотокатодов, усиливается за счет так называемой вторичной эмиссии (выбивание из металла одним первичным электроном нескольких вторичных электронов) и, наконец, достигая анода (+), замыкает ток. Ток регистрируется обычным измерительным прибором или приводит в действие счетный прибор.

## ЗАКОНОМЕРНОСТИ В МИРЕ СЛУЧАЙНОГО

Сколько заявлений от выпускников средней школы будет подано в этом году в тот или другой институт?

Сколько ошибок сделает тот или другой школьник в данной контрольной работе?

На какую облигацию вещевой лотереи выпадет выигрыш — транзисторный приемник «Эра»?

Нельзя заранее ответить на такие и другие подобные им и важные для вас вопросы, так как результат зависит от очень многих неизвестных нам обстоятельств. А между тем уже 300 лет существует отрасль математики, позволяющая если не точно, то в пределах от нуля до единицы определить вероятность наступления таких событий, которыми управляет случай. Она так и называется — «теория вероятностей».

Случай, счастье, судьба — эти столь распространенные и знакомые каждому выражения имеют теснейшее отношение к теории вероятностей.

Французский математик Эмиль Борель (1871—1956) рассказывает в своих воспоминаниях об одном курьезном интервью с неким корреспондентом, интересовавшимся, над какими проблемами работает ученый. Когда Борель ответил своему собеседнику, что он занимается проблемой случайности, то вопрошавший, не скрывая иронии, воскликнул: «Но разве можно что-либо извлечь из такой «великолепной» темы?». Тогда ученый вынужден был разъяснить, что он не нашел никакого та-

лисмана, предохраняющего от несчастья или сулящего верный успех. Разочарование отразилось на лице корреспондента — работы ученого над вопросами случайного, лишенные таинственности, теряли весь свой престиж, и лишь из вежливости он повторил свой вопрос: «Так над чем же собственно вы работаете?» Но в интонации сквозила уже такая незаинтересованность, что Борель поспешил направить беседу по другому руслу.

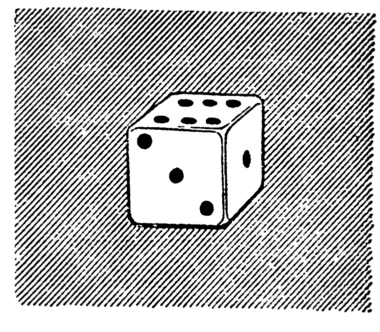


Рис. 119. Кубик для игры в кости.

Не ждите, читатель, и вы, что, прочитав эту статью, вы сможете разгадывать тайны судьбы, станете всемогущим обладателем неизменного счастья. И все же мир случайного, в который мы собираемся вас ввести, полон исключительного интереса. Не прибегая к сложным математическим приемам, мы постараемся дать вам представление об увлекательном методе исследования закономерностей окружающего нас мира, именуемом теорией вероятностей.

Недаром величайшие математики мира: Паскаль, Лаплас, Ферма́, Гаусс, Чебышев — посвятили этой науке свои труды. Выдающиеся советские математики А. Н. Колмогоров, А. Я. Хинчин и другие работают и занимают ведущую роль в этой отрасли.

Статистика со всеми ее приложениями в технической, экономической и социальной жизни страны, измерительная техника, планирование экспериментов, молодая еще область — теория информации представляют собой практическое использование теории вероятностей. В физике на исследовании массовых, случайных явлений базируется молекулярно-кинетическая теория и получают истолкование законы термодинамики. Квантовая физика со всеми ее теоретическими и практическими приложениями в области атомных и ядерных исследований тоже неотделима от теории вероятностей.

Войдем же, читатель, в мир, где царствует Случай.

**Задача кавалера де Мере.** В наши дни кубик с помеченными номерами граней (рис. 119) применяется только в детских настольных играх, но когда-то бросание таких кубиков представляло излюбленную игру. В кости (костяные кубики, помещенные в бокал, из которого игроки выбрасывали их по очереди на стол) играли еще древние римляне. Очень распространенными были игры в кости в XVI и XVII веках в Европе. Страстный игрок в кости, француз кавалер де Мере обратился однажды к своему другу математику Паскалю с просьбой решить такую задачу: «Как надо разделить между игроками ставку, если игра не была окончена, т. е. ни один из игроков не успел выиграть

положенного для победы числа партий, когда по какой-либо причине игра была прервана?»

Ясно, что игра в кости относится к азартным играм, т. е. играм, где выигрыш является случайным, не зависящим от ловкости или умения игрока. Название «азартный» происходит от французского слова hasard (читать — «азар»), что означает случай, счастье. Шахматы, напротив, не являются азартной игрой.

Задача, условие которой Паскаль сообщил в письме другому математику, Ферма́, была решена ими почти одновременно. 1654 год, когда между Паскалем и Ферма́ завязалась переписка по поводу этой задачи, можно считать началом теории вероятностей.

Паскаль начинает свое решение с разбора простейшего случая, когда из трех нужных для выигрыша партий игрок $A$ выиграл две, а игрок $B$ только одну.

Что могло случиться, если бы игра продолжалась? При первом следующем выбрасывании костей выиграть могут одинаково как $A$, так и $B$. Если выиграет $A$, он и получает всю ставку (1). Если же выиграет $B$, то счет сравняется, шансы на победу станут равными и, следовательно, в этом случае ставка должна быть поделена поровну ($^1/_2 + {}^1/_2$). Но так как игра была прервана до этого, то вторая половина ставки пока не принадлежит ни $A$, ни $B$ и потому должна быть поделена поровну (первая половина в том и другом случае, бесспорно, достанется $A$). Следовательно, первый игрок может сейчас претендовать на $^1/_2 + {}^1/_2 \cdot {}^1/_2 = {}^3/_4$ ставки, а второй — на $^1/_2 \cdot {}^1/_2 = {}^1/_4$. Дальше Паскаль разбирает другие возможности: когда $A$ выиграл две, а $B$ ни одной партии (решение: доля $A$ равна $^7/_8$) и, наконец, когда счет 1 : 0 в пользу $A$ (решение: $A$ получит $^{11}/_{16}$).

В более общем виде Паскаль дал решение задачи в своем сочинении об «арифметическом треугольнике». Вы слышали о треугольнике Паскаля? Вот он:

$$\begin{array}{ccccccccccc} & & & & & 1 & & & & & \\ & & & & 1 & & 1 & & & & \\ & & & 1 & & 2 & & 1 & & & \\ & & 1 & & 3 & & 3 & & 1 & & \\ & 1 & & 4 & & 6 & & 4 & & 1 & \\ 1 & & 5 & & 10 & & 10 & & 5 & & 1 \end{array}$$

В этом треугольнике каждый ряд начинается и кончается единицей, а остальные числа ряда составляются как суммы двух чисел предыдущего ряда, расположенных справа и слева от него.

Этот замечательный треугольник — предтеча известной формулы бинома Ньютона $(a + b)^n$, коэффициенты которого и представлены числами треугольника Паскаля:

$$(a+b)^0 = \dots\dots\dots\dots 1$$
$$(a+b)^1 = \dots\dots\dots\dots 1a + 1b$$
$$(a+b)^2 = \dots\dots\dots\dots 1a^2 + 2ab + 1b^2$$
$$(a+b)^3 = \dots\dots\dots\dots 1a^3 + 3a^2b + 3ab^2 + 1b^3$$
$$(a+b)^4 = \dots\dots\dots\dots 1a^4 + 4a^3b + 6a^2b^2 + 4ab^3 + 1b^4$$

Как известно, коэффициенты приведенных рядов вычисляются по формуле сочетаний.

Ферма́ в своем решении исходил тоже из соотношений открытой им теории сочетаний.

**Что же такое теория вероятностей?** Теория вероятностей дает нам метод нахождения числовых закономерностей в среде массовых случайных явлений.

Случайными мы называем события, зависящие от множества причин, связь между которыми проследить и установить не представляется возможным. При многократном повторении таких явлений проявляются своеобразные закономерности, которые можно назвать закономерностями случайного. При этом случайность нельзя толковать только как незнание всех причин явления, а законы случайности не являются просто результатом наших наблюдений, а существуют объективно, независимо от нас.

Не следует, однако, случайность смешивать с беспричинностью. В мире все имеет причину. Но случайным называется событие тогда, когда оно является лишь возможным (вероятным), и наступление его могло бы и не произойти. Для пояснения приведем общеизвестный пример, который обычно разбирается в книгах, посвященных вопросу о случайности и необходимости.

Человек, отправляясь по своим делам, проходит по улице. Лицо, которое было бы в курсе этих дел, могло бы сказать, почему он прошел по такой-то улице, в таком-то часу. На крыше работает кровельщик, и эта работа вызвана тоже целым рядом причин. Но прохожий, о котором была речь, не думает вовсе о кровельщике, как и кровельщик не думает о прохожем. Они звенья двух совершенно разных цепей причинно связанных событий. И тем не менее кровельщик уронил черепицу, которая убила прохожего. Мы, не колеблясь, скажем, что это дело случая. Но было ли это несчастье необходимо? Как мало было бы нужно, чтобы прохожий прошел на одну секунду раньше или чтобы кровельщик уронил свою черепицу на одну секунду позже, и тогда несчастье не произошло бы.

Но, быть может, кто-нибудь возразит, что, поскольку беспричинных событий не бывает и все в мире связано сложным рядом причин и следствий, прохожий неизбежно должен был оказаться в данный момент в данном месте и удар черепицей не мог в силу всей цепи предшествовавших событий именно в этот момент не поразить прохожего? «Рок», «судьба», «чему

быть, того не миновать» — таково мировоззрение фаталистов. Такая «философия» лишила бы нас всякой воли к жизни, и общество или отдельный человек, придерживающийся такой философии, не могли бы существовать. К чему бороться, к чему целеустремленные поступки, если все неизбежно должно наступить само собой? Проследив в обратном порядке всю последовательность причин и следствий, мы, казалось бы, могли наперед предсказать или предвидеть все будущее, не в силах, однако, его как-либо изменить.

Основоположник теории вероятностей французский математик Лаплас так выразил эту мысль: «Ум, которому были бы известны, для какого-либо данного момента, все силы, одушевляющие природу, и относительное положение всех ее составных частей, если бы он вдобавок оказался достаточно обширным, чтобы подчинить эти данные анализу, обнял бы в одной формуле движения величайших тел Вселенной наравне с движениями легчайших атомов; не осталось бы ничего, что бы было для него недостоверным, и будущее, так же как и прошедшее, предстало бы перед его взором».

Невозможность охвата всей бесконечной в пространстве и времени Вселенной такой единой мировой формулой понятна каждому.

Теория вероятностей представляет собой приложение математического метода к нахождению числовых закономерностей *массовых* случайных явлений. Но разве можно говорить о закономерностях, а тем более о числовом выражении их по отношению к случайным явлениям? Обратите внимание: мы подчеркнули слово «массовых». Если мы будем рассматривать небольшое число случайных явлений, то мы не заметим никакой закономерности. Бросая кубик с выбитыми на его гранях цифрами 1, 2, 3, 4, 5, 6, мы не можем сказать заранее, какая грань окажется наверху при падении кубика на стол. Если кубик сделан из однородного материала и имеет математически правильную форму, то выпадение любой цифры является равновозможным. При повторении бросаний выпадение какого-либо числа, например шестерки, не представляет какой-нибудь правильности: то шестерка появляется несколько раз подряд, то совершенно не выпадает. Однако если «опыт» повторять много раз, то обнаруживается уже некоторое постоянство: отношение числа удачных опытов (выпадение шестерки) к общему числу бросаний приближается к дроби $^1/_6$. То же, конечно, было бы справедливо и относительно любой другой цифры: пятерки, двойки и т. д. Мы говорим поэтому, что вероятность выпадения какого-нибудь наперед выбранного числа при бросании кубика равна $^1/_6$.

Отношение числа благоприятных случаев к числу всех равновозможных случаев и называют вероятностью события.

П р и м е р 1. В ящике находятся 10 тщательно перемешанных шаров, совершенно одинаковых по размерам, материалу,

тщательности отделки, но различающихся по цвету: 5 шаров белых, 3 черных и 2 красных. Какова вероятность вынуть шар определенного цвета?

Применяя указанное определение, мы делаем вывод, что вероятность вынуть белый шар равна $^5/_{10}$, или $^1/_2$, черный — $^3/_{10}$, красный — $^2/_{10}$.

Попробуйте проверить это на опыте, повторяя его несколько раз, причем не забывайте возвращать каждый раз вынутый шар обратно в ящик.

Разумеется, если число опытов будет невелико, то, возможно, никакой правильности вы не заметите и можете подряд вынимать несколько раз шар одного и того же цвета, но при многократном повторении число появлений белого шара будет примерно равно 50%, черного — 30%, красного — 20% от числа опытов.

Пример 2. Вы стоите на трамвайной остановке и ожидаете нужного вам номера трамвая. Допустим, что через эту остановку проходят 2 маршрута: один маршрут обслуживают 20 трамваев, другой — 30 трамваев. Какова вероятность, что сейчас подойдет трамвай, следующий по первому маршруту? Решение предоставляем вам сделать самостоятельно.

Однако не обвиняйте теорию вероятностей, если к вашей досаде пройдут один за другим три неподходящих для вас номера. Частота повторения событий совпадает с вычисленной вероятностью лишь при многократном повторении явления.

Приведем без доказательства еще три примера: один на сложение вероятностей, два — на умножение вероятностей.

*Теорема сложения вероятностей*. Вероятность двух взаимоисключающих событий равна сумме вероятностей каждого из них.

Пример. В ящике пять белых, семь зеленых и восемь красных шаров. Какова вероятность вынуть цветной шар, т. е. зеленый или красный?

Решение. Вероятность вынуть зеленый шар — $^7/_{20}$, вероятность вынуть красный — $^8/_{20}$. Следовательно, на основании теоремы о сложении вероятностей вероятность вынуть цветной шар равна:

$$\frac{7}{20}+\frac{8}{20}=\frac{15}{20}=\frac{3}{4}.$$

*Теорема умножения вероятностей*. Вероятность сложного события, представляющего совпадение двух независимых простых событий, равняется произведению вероятностей этих простых событий.

Пример 1. Допустим, требуется определить вероятность того, что из двух отдельных ящиков будет вынут шар одного и того же цвета, например красного. В первом ящике находятся 6 белых, 2 красных и 2 черных шара. Во втором — 5 белых, 5 красных и 5 черных шаров.

Решение. Вероятность вынуть красный шар из первого ящика равна $^2/_{10}$ ($^1/_5$).

Вероятность вынуть красный шар из второго ящика равна $^5/_{15}$($^1/_3$).

Вероятности вынуть красный шар из первого и второго ящика не зависят друг от друга, и потому вероятность совпадения этих событий (красный и из первого и из второго ящика) будет равна $^1/_5 \cdot {}^1/_3 = {}^1/_{15}$ .

Пример 2. В ящике 20 шаров, из них 5 красных, 8 синих, 2 зеленых, остальные белые. Какова вероятность вынуть в первый раз красный, во второй — синий, в третий — зеленый? Вынутые шары после каждого опыта возвращаются в ящик.

Решение. Вероятности появления красного, синего и зеленого шаров в отдельности равны: $^5/_{20} = {}^1/_4$; $^8/_{20} = {}^2/_5$; $^2/_{20} = {}^1/_{10}$.

Следовательно, вероятность сложного события — последовательного появления трех указанных цветных шаров равна произведению $^1/_4 \cdot {}^2/_5 \cdot {}^1/_{10} = {}^1/_{100}$.

Мы будем использовать названные закономерности в дальнейших беседах.

Закон больших чисел. Люди, ничего не слышавшие о теории вероятностей, склонны иногда поддаваться иллюзорным надеждам, строя свою «теорию» счастья, «везения» и «невезения». Азартные игры — убедительное доказательство того. Сколько несчастных жертв своей страсти разорялось в игровом доме в Монте-Карло*! Знаменитая рулетка, привлекающая туда искателей счастья, — это диск, разделенный на секторы красного и черного цветов. Диск приводится во вращение, и игрок, поставивший на красное, выигрывает, если шарик, пущенный крупье по диску в обратном направлении, остановится на красном секторе. Прежде чем решиться поставить свои деньги, игрок присматривается, как идет игра. Допустим, девять раз выигрыш падал на черное. С бьющимся сердцем ставит наш «наблюдатель» крупную сумму «на красное», полагая, что многократное повторение черного делает более вероятным теперь появление красного. Печальное заблуждение! При двух равновозможных результатах (красное и черное) вероятность выпадения красного и теперь осталась равной $^1/_2$, как и была в самом начале игры.

Ну, а если 99 раз было черное, неужели на сотый раз не выпадет красное? Все равно вероятность выпадения одного из двух возможных цветов остается равной $^1/_2$ при любом числе бросаний: и в сотый раз с одинаковой вероятностью выигрыш может пасть и на красное, и на черное, как и в первый раз. Только вот сомнительно, чтобы он 99 раз падал на черное или только на красное. И чем больше будет повторений партий,

---

* Столица миниатюрного княжества Монако на берегу Средиземного моря

тем более сомнительным будет наступление одного и того же из двух равновозможных событий. В этом состоит закон больших чисел: частота наступления какого-нибудь случайного события (выраженная дробью или в процентах от общего числа событий) при увеличении числа случаев неограниченно приближается к некоторому пределу, который равняется математической вероятности события.

Попробуйте проверить это на опыте, бросая много раз игральный кубик (вероятность выпадения одной грани равна $^1/_6$) или монету (вероятность выпадения герба или решки равна $^1/_2$).

В более общем смысле под законом больших чисел понимается одно из основных положений теории вероятностей, согласно которому совокупное действие большого числа случайных причин приводит при некоторых условиях к результату, почти не зависящему от случая. Закономерный характер явления выступает с тем большей четкостью, чем больше наблюдений было сделано. При этом случайные непостоянные причины, под влиянием которых могут быть в каждом отдельном случае отклонения в ту или другую сторону, нейтрализуются и наружу выступает действие общих, более основных факторов. Закон больших чисел выражается в том, что, чем больше число наблюдаемых случаев, тем больше вероятность, что результат наблюдений приблизится к истинному значению отыскиваемой величины.

С какого же числа наблюдений вступает в силу закон больших чисел? Ответить на этот вопрос так же трудно, как на известный софизм древних греков: с какого зерна пшеницы начинается «куча»? Одно зерно не составляет кучи, как не составляют ее ни два, ни три зерна... С другой стороны, каждый согласится, что миллион зерен образует кучу. Где же грань? Можно ли допустить, что 325 647 зерен не образуют кучу, тогда как при 325 648 зерен она налицо?!

Прежде чем перейти к рассмотрению практических приложений теории вероятностей, расскажем об одной любопытной задаче, предложенной французским естествоиспытателем Бюффоном (1707—1788).

**«Игла Бюффона».** Возьмите иголку или булавку длиной приблизительно в 3 *см*. На листе белой бумаги начертите ряд параллельных прямых, удаленных одна от другой тоже на 3 *см*. Затем бросайте много раз иголку с некоторой высоты вертикально вниз, не нацеливаясь на какую-либо из параллелей (рис. 120). Отмечайте число падений, при которых иголка пересекает какую-нибудь из параллельных линий (или хотя бы касается в одной точке), а также считайте общее число падений. Результат с первого взгляда кажется чудесным: при большом (несколько сот) числе бросаний отношение общего числа бросаний к числу точек пересечения приближается к знаменитому числу $\pi$, поделенному пополам! Повторите этот опыт — и вы на личном опыте убедитесь в справедливости сказанного, а за-

одно получите число π, не прибегая к геометрическим выводам.

Объяснить это «случайное» совпадение нетрудно. Объяснение наше базируется на двух самоочевидных предположениях:

1. Число точек пересечения пропорционально длине булавки, так как любая точка ее имеет равные возможности встречи с прямой. Чем больше точек на булавке, т. е. чем она длиннее, тем больше возможность встречи.

2. Число точек пересечения не зависит от формы булавки. Булавка может быть прямой, согнутой один или несколько раз или даже свернута в окружность (рис. 121, *а*). При этом считаются все точки пересечения кривой булавки с начерченными параллельными линиями.

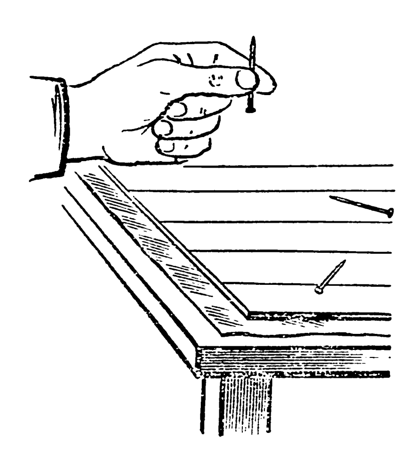


Рис. 120. Игла Бюффона.

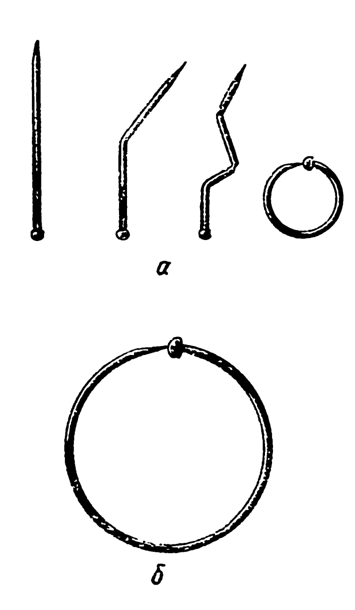



Рис. 121. Объяснение к опыту с иглой Бюффона.

Теперь возьмите булавку (проволоку), свернутую в окружность диаметром 3 *см*, т. е. длина этой булавки в π раз больше длины прежней булавки (рис. 121, *б*). При таком диаметре число точек пересечений с параллелями будет постоянно равно двум: или как число пересечений хорды с окружностью, или как две точки касания по концам диаметра. Для первой же булавки, длина которой в π раз меньше, число пересечений в расчете на одно падение тоже будет в π раз меньше, т. е. будет равно $\frac{2}{\pi}$. При $n$ падениях получим $\frac{2}{\pi}\,n$ пересечений, а согласно определению вероятности, вероятность такого числа пересечений будет равна отношению всех пересечений (число благоприятных случаев) к общему числу всех бросаний:

$$\frac{2}{\pi}n : n = \frac{2}{\pi}.$$

Наоборот, отношение числа бросаний к числу пересечений будет $\frac{\pi}{2}$, что и требовалось доказать и в чем вы можете убедиться на опыте, повторяя его много раз (не меньше пятисот).

**Случайности в нашей жизни.** Сложное переплетение различных рядов взаимосвязанных явлений практически воспринимается нами как случайность событий. А между тем при массовом наблюдении случайных событий можно подметить явно выраженную закономерность. Нахождением такой закономерности занимается основанная на теории вероятностей статистика.

«Застраховал ли ты свою жизнь?», «Не забудь застраховать свое имущество от пожара!», «Страхование от несчастных случаев на транспорте» — такие предупредительные плакаты и призывы можно видеть на стенах различных контор, сберегательных касс, вокзалов. Конечно, речь здесь идет не о гарантии против возможности несчастного случая, и застраховавший свою жизнь не имеет ни одного лишнего шанса избежать смерти сравнительно с незастрахованным. Речь идет о том, чтобы только смягчить последствия постигшего несчастья для самого пострадавшего или его семьи. В случае несчастья страхующая организация выплачивает пострадавшим некоторую, оговоренную в страховом полисе сумму.

Возникает вопрос: является ли такая выплата денег видом государственной помощи и возмещается ли выплаченная сумма ежегодными взносами, вносимыми самими застрахованными до несчастного случая? Ведь если в социалистических государствах страховые расходы входят в общую смету социального обеспечения, то в капиталистических странах дело страхования находится в руках частных страховых компаний, основой существования которых, конечно, является не разорительная благотворительность и не человеколюбие, а дивиденды (доходы) акционеров. Очевидно, для безубыточности страхового дела необходим точный расчет того, сколько страховое общество должно будет выплатить страховых премий за год и какие суммы оно может получить со взносов от застрахованных. Многочисленные наблюдения над множеством событий позволяют обнаружить надежную закономерность в таких случайных событиях, как пожар, железнодорожная или авиационная катастрофа, смерть...

Статистические сводки охватывают самые разнообразные, значительные и незначительные случаи нашей жизни. Вот, например, любопытная закономерность, о которой сообщает проф. П. А. Вихляев в своей книге «Очерки теоретической статистики». Опускание в почтовый ящик писем без надписания адреса, несомненно, действие случайное. Однако, суммируя такого рода почтовые отправления, почтовая статистика дает следующие цифры:

на миллион писем отправлено без адреса в

| | | | |
|---|---|---|---|
| 1906 г. . . . . . | 27 писем | 1909 г. . . . | 25 писем |
| 1907 г. . . . . . | 25 » | 1910 г. . . . | 25 » |
| 1908 г. . . . . . | 27 » | | |

Или вот таблица смертности от несчастных случаев на каждые 100 000 человек населения:

| | | |
|---|---|---|
| 1892 г. — 32,8 | 1896 г. — 35,0 | 1900 г. — 36,7 |
| 1893 г. — 31,9 | 1897 г. — 36,0 | 1901 г. — 35,1 |
| 1894 г. — 31,6 | 1898 г. — 36,2 | 1902 г. — 32,5 |
| 1895 г. — 32,6 | 1899 г. — 36,2 | |

Не следует, однако, из вышесказанного делать заключение, что представленные здесь статистические ряды незыблемо сохраняют свою устойчивость при всех условиях. На самом деле это далеко не так. Достаточно вмешательства в закономерное течение рядов какого-либо крупного постороннего фактора или существенного изменения ранее имевшихся условий, чтобы члены ряда заколебались и утратили свое прежнее закономерное течение. Например, войны вызывают колоссальное повышение смертности, понижение рождаемости.

Приглядитесь также к диаграммам (рис. 122, 123), составленным по данным демографического ежегодника ООН. Чем культурнее страна, чем выше уровень жизни и здравоохранения, тем большее число людей доживает до глубокой старости.

В Гватемале, например, смертность детей так велика, что даже не удалось изобразить ее на этом графике, пришлось

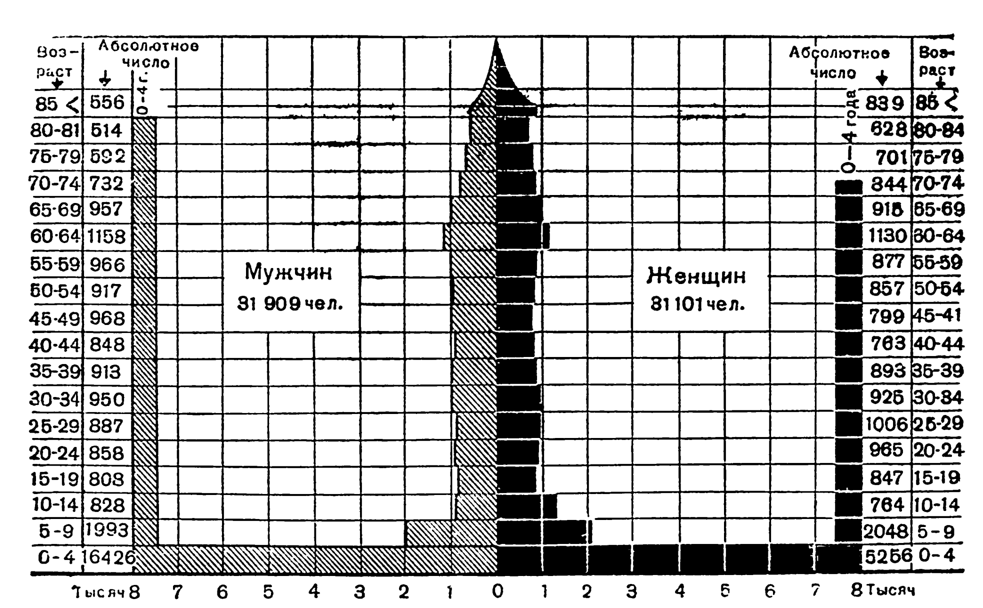



Рис. 122. Число умерших по возрасту и полу в Гватемале в 1959 г.

| Возраст | Абсолютное число | Абсолютное число | Возраст |
|---|---|---|---|
| 85 < | 4377 | 5410 | 85 < |
| 80-84 | 5364 | 5831 | 80-84 |
| 75-79 | 5855 | 5942 | 75-79 |
| 70-74 | 5622 | 5026 | 70-74 |
| 65-69 | 4164 | 3438 | 65-69 |
| 60-64 | 3072 | 2324 | 60-64 |
| 55-59 | 2320 | 1583 | 55-59 |
| 50-54 | 1590 | 1124 | 50-54 |
| 45-49 | 1118 | 718 | 45-49 |
| 40-44 | 603 | 502 | 40-44 |
| 35-39 | 468 | 340 | 35-39 |
| 30-34 | 329 | 174 | 30-34 |
| 25-29 | 259 | 133 | 25-29 |
| 20-24 | 283 | 104 | 20-24 |
| 15-19 | 261 | 102 | 15-19 |
| 10-14 | 133 | 69 | 10-14 |
| 5-9 | 161 | 90 | 5-9 |
| 0-4 | 1259 | 841 | 0-4 |

Мужчин 37 138 чел.

Женщин 33 751 чел.

6 5 4 3 2 1 0 1 2 3 4 5 6

Рис. 123. Число умерших по возрасту и полу в Швеции в 1959 г.

поднять вверх концы нижней полосы, показывающей число умерших в возрасте до четырех лет.

Для высокоразвитой Швеции график принимает ясную грибовидную форму. Узкая «ножка» показывает, как мало (сравнительно) людей умирает в детские и юношеские годы, наибольшее число умерших приходится на старческие возрасты.

Великие социальные преобразования в нашей стране привели к резкому повышению среднего возраста жизни, достигшему к 1964 г. 70 лет.

А вот образная агитация за здоровый образ жизни. Режим, гигиена, физкультура и спорт — влияющие факторы долголетия. Рисунок 124 образно иллюстрирует это: вы видите, что стройные, подтянутые люди имеют больше шансов перешагнуть далекие границы жизни, чем толстяки, неумеренные в пище и питье.

«Жизнь — запутанность и сложность». Невозможно не только списать, но даже перечислить все случаи нашей жизни, в которых количественное исследование массовых явлений, объединяемое статистикой, находит практическое применение. Вопросы страхования имущества, учет народонаселения, вопросы градостроительства, расписание движения городского и железнодорожного транспорта, учет и контроль производства, вопросы сельского и лесного хозяйства, прогнозы погоды и т. д. и т. п. — все эти жизненно важные для каждого из нас вопросы входят в задачу статистики.

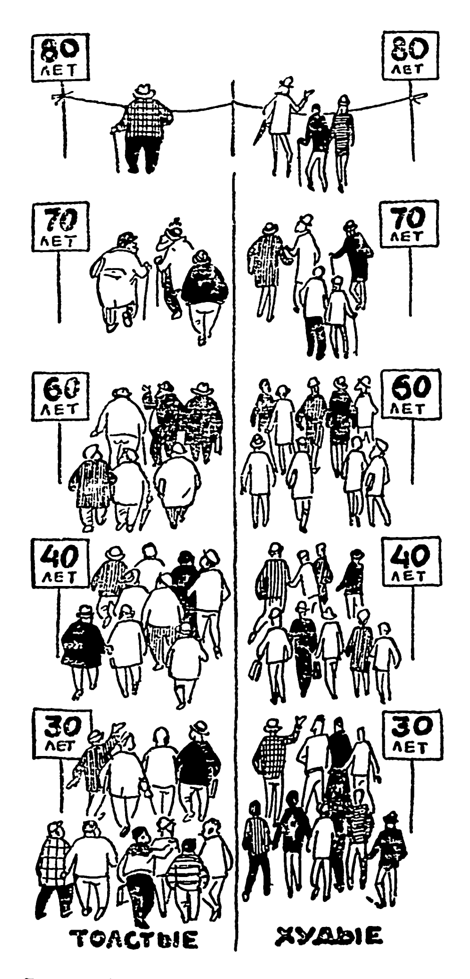



Рис. 124. Кто имеет больше шансов дожить до глубокой старости?

Закономерности случайных явлений устанавливаются путем многократных наблюдений в течение или многих лет или над многими объектами. На основании полученных наблюдений составляются таблицы, устанавливаются математические связи (формулы). Установленная зависимость между явлениями дает иногда возможность практически влиять на течение какого-нибудь процесса в желаемом для нас направлении. На производстве, например, статистический контроль позволяет провести ряд рационализаторских мероприятий для повышения качества изделий, уменьшения брака, повышения производительности труда.

Обнаруживаемые по статистическим наблюдениям закономерности не всегда оказываются функциональными. Гораздо чаще множество причин, сказывающих влияние на наблюдаемое явление, дает возможность установить только вероятную связь между явлениями. Такая зависимость, более сложная, чем функциональная, называется корреляционной зависимостью. Например, в лесной статистике корреляционной является зависимость между высотой дерева и диаметром ствола. Хотя в основном более высокие деревья должны быть и более толстыми, однако влияние почвы, условий освещения и ряда других причин может вызвать значительные отклонения от простой зависимости. Произведя значительное число измерений высот и диаметров (диаметр измеряется на высоте груди), можно в известной степени исключить эти привходящие условия и вывести некоторую среднюю, наиболее вероятную величину диаметра, соответствующую данному значению высоты дерева.

Таким образом, отличие корреляционной зависимости от функциональной состоит в том, что в функциональной зависимости одному значению независимой переменной соответствует

вполне определенное значение величины зависимой, в корреляционной же связи можно говорить лишь о вероятности значения этой величины.

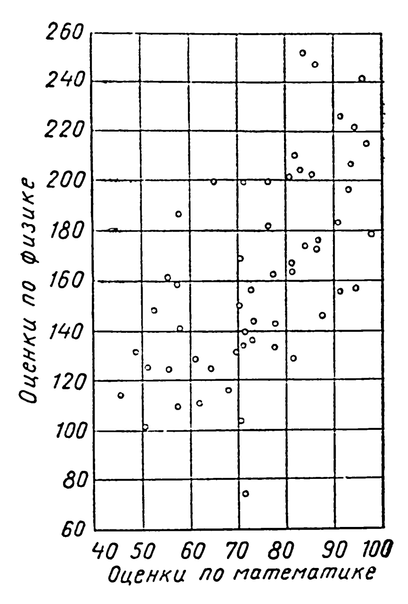


Рис. 125. Корреляционная таблица.

Корреляционная зависимость может быть представлена не только таблицей, но и графиком и даже формулами. Такие формулы называются эмпирическими, так как коэффициенты при переменных подбираются на основании наблюдений или опытов. При установлении эмпирической формулы, например, для двух переменных величин путем последовательных проб подбирают коэффициенты, идя от низших степеней к высшим в предполагаемом ряде $y = a + bx + cx^2 + dx^3 + \ldots$ и проверяя совпадение вычисленных значений функции с наблюдаемыми.

При графическом изображении корреляционной зависимости можно видеть, что в отличие от графиков функций точки, соответствующие величинам по данным наблюдений, оказываются более или менее разбросанными по полю координационной сетки. Чем теснее группируются они около определенных линий (прямой линии, параболы и др.), тем теснее связь между величинами, т. е. зависимость ближе к функциональной.

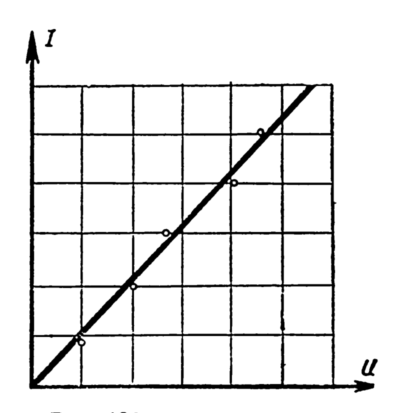


Рис. 126. Функциональная зависимость.

Степень корреляционной связи может быть выражена и численно при помощи так называемого коэффициента корреляции, меняющегося от 0 до $\pm 1$. Если коэффициент корреляции равен нулю, то между сопоставляемыми величинами нет никакой связи. В случае прямой (функциональной) за-

висимости коэффициент корреляции достигает значения +1, в случае обратной зависимости он равен —1.

Мы не можем в данной беседе входить в подробности этого специального технически важного вопроса. Отметим только, что история физики знает немало примеров, когда зависимость, определенная первоначально как корреляционная, с развитием науки становилась строго доказанной функциональной зависимостью. В качестве наиболее известного примера напомним нашим читателям статью из II части «Бесед по физике» — «Как Ом математически разрабатывал свой закон». Установленная Омом эмпирически зависимость между током и напряжением сейчас легко выводится теоретически на основании электронных представлений.

В пояснение приведем еще один пример корреляционной зависимости из области педагогики. Наблюдается, что учащиеся, хорошо успевающие по математике, имеют в то же время высокие оценки по физике. Такая связь естественна, поскольку физика широко пользуется приемами и методами математики, однако назвать эту зависимость функциональной, конечно, нельзя. В таблице (рис. 125) показано корреляционное поле, составленное на основании результатов обследования оценок успеваемости по математике и физике в одном английском колледже. Общий характер прямой зависимости между оценками по математике и по физике выражен вполне ясно, но точки, изображающие отдельные случаи, широко разбросаны по координационной сетке, и отклонения от линейной функциональной зависимости не могут быть объяснены случайными отклонениями, какие обычно наблюдаются при графическом изображении результатов при лабораторном определении связи между прямо пропорциональными величинами (рис. 126). Зависимость между экзаменационными оценками по математике и физике только корреляционная. Коэффициент корреляции в данном примере равняется +0,61.

## ПРОДОЛЖИТЕЛЬНОСТЬ ЖИЗНИ АТОМА

Да! Атомы тоже родятся, живут и умирают... Разумеется, эти слова надо понимать в переносном смысле. К биографии атома совершенно неприменимы такие общечеловеческие понятия, как детство, юность, зрелый возраст и старость. Атомы не растут, не стареют, и три фазы истории какого-нибудь атома — рождение, жизнь, смерть — это только образное выражение ступеней в структуре сложного строения атома, причем вторая ступень — жизнь — у различных атомов может измеряться от миллионных долей секунды до... миллионов миллионов лет, практически до бесконечности.

Впервые с превращениями в мире атомов, считавшихся раньше вечными неделимыми частицами вещества, физики столкнулись, когда А. Беккерелем и супругами Кюри была

открыта радиоактивность (1896—1899 гг.). С тех пор обнаружено около сорока природных радиоактивных элементов, группируемых обычно в три радиоактивных семейства: урана — радия, урана — актиния и тория.

В 1934 г. Ирэн и Фредерик Жолио-Кюри доказали возможность создания искусственных радиоактивных элементов и радиоактивных изотопов. В настоящее время у каждого обычного нерадиоактивного (стабильного) элемента имеется по крайней мере один радиоактивный изотоп. Широко известны радиоактивные натрий, иод, фосфор, кобальт и др.

Нет необходимости пояснять нашим читателям, что слово «радиоактивность» означает способность вещества испускать невидимые, но сильно действующие лучи (в общем случае $\alpha$-, $\beta$- и $\gamma$-лучи), что при этом происходит глубокое изменение химических свойств вещества. Атомы радиоактивных элементов, излучая, превращаются в атомы другого элемента. Еще в 1903 г. Резерфорд и Содди пришли к смелой мысли о том, что явление радиоактивности состоит в распаде атома. Чтобы оценить смелость этой мысли, необходимо учесть, что она была высказана за 10 лет до возникновения учения о строении атома, т. е. в то время, когда атом считался абсолютно неделимой частицей вещества.

В настоящее время понятие «атом» сохранило смысл неделимости, когда речь идет о порции вещества, вступающей в различные химические реакции. Неделимость при этом такого же сорта, как неделимость какого-нибудь животного индивидуума (человека, животного или растения) или даже механизма или предмета (часы, стакан и пр.).

Радиоактивный распад состоит в глубоком превращении, связанном с изменением ядра атома. Как известно, ядро атома состоит из частиц — нуклонов (nucleus — ядро) двух типов — протонов ($^{1}_{1}H$) и нейтронов ($^{1}_{0}n$). Нейтрон электрически нейтрален, а протон обладает положительным зарядом, равным по абсолютной величине заряду электрона.

Число протонов определяет место элемента в периодической таблице и строго соответствует числу электронов в оболочке атома. Химические реакции затрагивают только оболочку атома, ядро же остается надежно защищенным и никаким изменениям при химических превращениях не подвергается. Химические свойства элемента определяются только наличием электронов в наружных слоях оболочки атома.

С открытием радиоактивности возникла ядерная физика, совершенно перестроившая наше понятие об атомах.

Различают два вида распада ядра: альфа-распад и бета-распад. При $\alpha$-распаде ядро самопроизвольно выделяет $\alpha$-частицы, которые, как показало исследование, представляют собой ядра гелия, состоящие из двух протонов ($He^{++}$). Потеря двух протонов сопровождается соответствующим уменьшением

числа электронов в оболочке, что в свою очередь ведет к изменению химической природы элемента и переводит его на два места влево в периодической системе элементов. Так, радий $^{226}_{88}Ra$, имевший 88 протонов, выбросив из ядра $\alpha$-частицу, превращается в радон (эманация радия) $^{222}_{86}Rn$. Радон встречается в природе в ничтожной примеси к воздуху или растворенным в воде. Источники, содержащие значительное количество радона, используются для лечебных целей (радоновые ванны курорта Цхалтубо и др.).

При $\beta$ -распаде происходит излучение электронов $e^-$ (или позитронов $e^+$) (в случае радиоактивных изотопов). Но ведь в ядре, это точно установлено, ни электронов, ни позитронов нет и быть не может. Как же тогда происходит $\beta$-распад ядра? Как может ядро излучать то, чего в нем нет? Это излучение связано с глубокими превращениями в самом ядре, с превращением протонов в нейтроны или нейтронов в протоны:

$$^1_1H \rightarrow {}^1_0n + e^+ \text{ (сумма зарядов равна } +1)$$

или

$$^1_0n \rightarrow {}^1_1H + e^- \text{ (сумма зарядов равна } 0)$$

В первом случае (искусственная радиоактивность) заряд ядра уменьшается на одну элементарную единицу, во втором — увеличивается, а это ведет к уменьшению или увеличению числа электронов в оболочке. Таким образом, закон сохранения зарядов, один из известных физике законов сохранения, соблюден — сумма зарядов справа и слева уравнения реакции распада постоянна. Однако детальное исследование показало, что вопрос с $\beta$-распадом значительно сложнее, и написанные реакции удовлетворяют только подсчету суммарных зарядов нуклона и продуктов его превращения. Подсчет же энергии, уносимой при этом электронами или позитронами, вызвал на первых порах большое брожение в умах физиков. Сумма энергий в правой и левой части уравнения реакции оказывалась не всегда одинаковой. Расхождение с законом сохранения энергии наблюдалось такое, что ставило под сомнение этот основной закон природы. Известный физик Бор высказывал даже предположение, что закон сохранения энергии неприменим в микромире. Положение спасла смелая гипотеза австрийского физика Паули, высказавшего в 1930 г. мысль, что среди продуктов распада, кроме указанных двух частиц, имеется третья маленькая нейтральная частица — нейтрино. Масса ее чрезвычайно мала, возможно равна нулю. Частица, не имеющая ни массы, ни заряда! Недаром более двадцати лет вела она призрачное существование: не частица, а одно предположение! Только сравнительно недавно (1953—1963 гг.) мощные реакторы и ускорители позволили, наконец, экспериментально доказать существование этой «гипотетической частицы». Не обладая массой покоя, нейтрино несется со скоростью света, другой, меньшей скорости она не может иметь. В покое эта неистовая частица тем более

быть не может. Можно поэтому представить, какие трудности стояли перед физиками, искавшими достоверных доказательств смелой гипотезы Паули. Следует учесть еще то, что задержать эти частицы невозможно. Академик АН СССР Бруно Понтекорво, работающий в Объединенном институте ядерных исследований в Дубне, в одной из популярных своих статей писал: «Самое характерное свойство нейтрино — ее потрясающая проникающая способность. Это напоминает мне анекдот о человеке, который, глядя на жирафа в зоопарке, бормочет: «Не может быть!» Пусть читатель судит сам: нейтрино может беспрепятственно проникать, скажем, через чугунную плиту, толщина которой в миллиард раз превышает расстояние от Земли до Солнца!»

Как же удалось поймать эту неуловимую частицу? Идея оказалась очень простой — надо было только повернуть назад β-распад, при котором нейтрон превращается в протон, электрон и нейтрино (точнее, антинейтрино) и, бомбардируя в реакторе при помощи нейтрино тонну вещества, содержащего водород (а следовательно, запас протонов), вызвать обратное превращение протона в нейтрон, что уже легко может быть обнаружено методами ядерной физики.

Однако вернемся к радиоактивному распаду. Итак, наблюдаются два вида распада — альфа-распад и бета-распад. Что касается γ-излучения, то это явление вторичное, следующее за α- и β-распадом. Гамма-лучи испускаются уже новым ядром, переходящим из возбужденного состояния в нормальное. Разумеется, ввиду кратковременности отдельных стадий процесса распада мы по времени не можем разделить их одну от другой.

В результате каждого α- или β- распада возникает новый элемент. Если он оказывается радиоактивным, то через какой-то промежуток времени происходит новый распад и образуется новое вещество, и так далее до тех пор, пока не получится нерадиоактивный, стабильный элемент. Например, $^{238}_{92}U$ после четырнадцати последовательных превращений дает нерадиоактивный свинец $^{206}_{82}Pb$.

Можно подсчитать, сколько α- и β- распадов произошло на пути от урана к свинцу. Масса иона гелия равна 4 атомным единицам, поэтому α-распад вызывает уменьшение массы атома на 4 единицы. Следовательно, уменьшение массы на 32 единицы произошло за 8 α-распадов. Вместе с тем атомное ядро, выбрасывая α-частицу, уменьшает свой заряд на два элементарных заряда ($\alpha = {}^4_2He$). За 8 распадов заряд должен уменьшиться на 16 элементарных зарядов. Но, как видно из химических символов, уменьшение заряда произошло только на 10 единиц (положительных).

Выброс электрона из ядра ведет, как мы видели, к перестройке ядра — нейтрон превращается в протон и, таким обра-

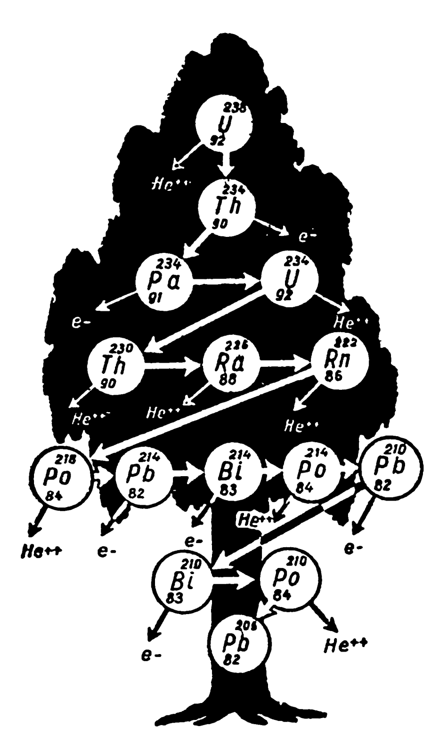



Рис. 127. Схема превращения урана в свинец.

зом, заряд ядра увеличивается на единицу. Следовательно, β-распадов было 6.

Отдельные ступени процесса показаны на схеме превращения урана в свинец (рис. 127). Внимательно проследите по этой схеме, соблюдаются ли указанные изменения заряда и массы по отдельным ступеням процесса.

Вас не должно удивлять, что среди промежуточных продуктов распада урана встречается несколько радиоактивных изотопов тория, полония, висмута, свинца. Каждый раз это новый элемент, с новыми свойствами. Вы найдете также среди членов семейства и тот элемент, открытие которого Марией Кюри-Склодовской положило начало ядерной физике и которому обязано названием и само явление радиоактивности — радий $^{226}_{88}$Ra.

Обратимся теперь к основному вопросу настоящей беседы — вопросу о продолжительности жизни атомов. Терминология может ввести в заблуждение: мы говорим о продолжительности жизни атомов, понимая под этим продолжительность существования постепенно распадающегося элемента.

Чтобы половина любого взятого количества урана $^{238}_{92}$U распалась и превратилась в свинец, надо 4,5 миллиарда лет, период полураспада радия — 1600 лет. Но это вовсе не значит, что весь данный запас урана распадется окончательно за следующие 4,5 миллиарда лет или оставшийся радий исчезнет за 1600 лет. Оставшаяся после распада половина радиоактивного вещества распадется в свою очередь только на половину за такое же время, что и первая половина, и таким образом останется еще четверть первоначального запаса, затем одна восьмая и т. д.

При этом совершенно ничего нельзя сказать о судьбе отдельного атома. Допустим, мы отметим в данной порции радия какой-нибудь определенный атом и будем поджидать, когда он распадется. Быть может, это случится в следующее мгновение, а может, через час, через год, через сотни, тысячи или многие миллионы лет. Предсказание становится невозможным. Здесь царит слепой случай. Расчеты, которые мы здесь имеем право делать, основаны на законах теории вероятностей и применимы

не к тому или иному атому, а к данному количеству вещества, содержащему огромное количество атомов. И дело здесь не в недостаточной нашей осведомленности относительно природы атомов.

Здесь уместно будет напомнить то, что говорилось о вероятности случайных событий, которую никак нельзя отождествлять с незнанием причин явления. Французский математик Анри Пуанкаре в своей книге «Наука и гипотеза» в таких словах разъясняет различие между случайностью явления и незнанием причин его: «Ясно, что случайность должна быть чем-то иным, не одним только названием, которое мы даем собственному невежеству. Сведения, которые дает нам о случайных явлениях теория вероятностей, не перестанут быть справедливыми в тот день, когда мы получим об этих явлениях больше сведений. Директор общества страхования жизни не знает, когда умрет каждое из застрахованных у него лиц, но он вычисляет на основании теории вероятностей и закона больших чисел и при этом не ошибается, ибо он делит дивиденды между акционерами. Эти дивиденды не исчезли бы даже и в том случае, если бы какой-либо врач, столь же прозорливый, сколь и нескромный, после подписания страховых полисов осведомил бы директора о шансах на жизнь застрахованных лиц. Такой врач рассеял бы неосведомленность директора, но он не оказал бы влияния на дивиденды, которые, очевидно, вовсе не являются продуктами этой неосведомленности».

Не раз делались попытки отыскать причины и физический смысл размера вероятности радиоактивного распада атома. Не влияют ли на распад какие-либо внешние воздействия: температура, давление, бомбардировка космическими лучами и т. д.? Нет. Распад данного радиоактивного вещества идет с одинаковой скоростью, при каких бы высоких или низких температурах он ни происходил. На скорость распада не оказывают воздействия ни сильные электрические или магнитные поля, ни катодные, рентгеновские или гамма-лучи. Ядра атомов надежно защищены от внешних воздействий своими электронными оболочками.

Предположение, что распад того или другого ядра предопределен какими-нибудь внутренними его дефектами или продолжительностью всей предыдущей истории его жизни, тоже не выдерживает критики. Вероятность распада ядра атома, просуществовавшего уже 1000 лет, та же самая, как и новорожденного атома.

Атомы не «стареют» и атомы не «запоминают» свою предысторию. Явление радиоактивного распада остается явлением случайным, но благодаря огромному числу атомов к этому явлению можно применить средние статистические выводы теории вероятностей.

Основной закон радиоактивного распада состоит в том, что отношение числа распавшихся за единицу времени атомов к

общему числу атомов в данной порции радиоактивного вещества остается постоянным.

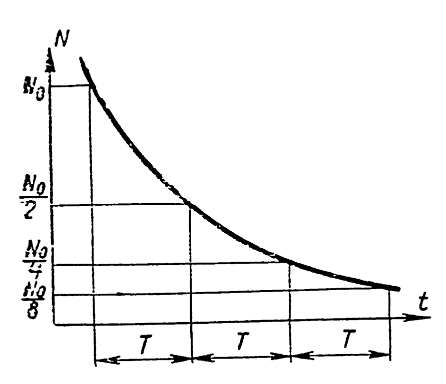



Рис. 128. График экспоненциального закона распада радия.

Вы легко можете изобразить этот закон графически. Примите горизонтальную ось координат за ось времени, а на вертикальной оси откладывайте числа атомов. Пусть первоначальное число атомов в данной порции радиоактивного вещества будет $N_0$ (рис. 128), отложите на оси времени отрезок $T$, за который произойдет распад вещества наполовину $\frac{N_0}{2}$. Продолжайте откладывать отрезки времени $T$ и уменьшать каждый раз ординаты вдвое. Вы получите ряд точек; плавная кривая, соединяющая их, и представляет график закона радиоактивного распада.

Полученный график есть график показательной функции, замечательная особенность которой заключается в том, что изменению аргумента в арифметической прогрессии (у нас — на одну и ту же величину $T$) соответствует изменение функции (числа атомов) в геометрической прогрессии. Такая закономерность называется экспоненциальной.

Аналитически этот закон для радиоактивного распада может быть записан так:

$$\frac{dN}{N} = \text{const}.$$

Отношение числа распавшихся атомов к общему числу еще не распавшихся при очень большом числе атомов можно рассматривать как вероятность распада одного атома за малый промежуток времени $dt$. Если вероятность распада атома за одну секунду обозначим $\lambda$, то по закону теории вероятностей эта вероятность распада атома будет для промежутка времени $dt$ равна $\lambda dt$. Иначе говоря,

$$\frac{dN}{N} = -\lambda dt$$

(знак минус поставлен потому, что происходит убывание числа атомов и $dN$ отрицательно).

Интегральное исчисление позволяет получить из этой формулы следующее выражение для статистического закона радиоактивного распада:

$$N = N_0 e^{-\lambda t},$$

или

$$\frac{N}{N_0} = e^{-\lambda t}.$$

Из алгебры вы знаете, что логарифмом называется показатель степени, в которую надо возвести основание, чтобы получить данное число. Следовательно, мы можем, принимая $e$ за основание натуральных логарифмов, написать:

$$-\lambda t = \ln \frac{N}{N_0}.$$

Обозначив период полураспада $\left(\frac{N}{N_0} = \frac{1}{2}\right)$ через $T$, получим:

$$\lambda T = -\ln \frac{1}{2} = 0{,}693,$$

откуда

$$T = \frac{0{,}693}{\lambda}.$$

Величина $\lambda$, называемая также постоянной радиораспада, имеет различные значения для разных элементов. Зная величину $\lambda$, мы можем вычислить период полураспада радиоактивного элемента. Именно из таких расчетов получились упомянутые выше значения периодов полураспада радия — 1600 лет, урана — 4,5 миллиарда лет. Известны радиоактивные вещества с периодом полураспада в тысячные и миллионные доли секунды.

Но как же это узнали?! — воскликнет читатель. Кто мог измерить период в 4,5 миллиарда лет и как можно измерить промежуток времени в миллионные доли секунды?!

Для элементов, период полураспада которых невелик — от нескольких минут до нескольких дней, — уменьшение радиоактивности можно обнаружить и определить для изолированного количества вещества путем непосредственного наблюдения. Различного типа ионизационные камеры, счетчики ионизационных частиц позволяют с достаточной точностью сделать подобные измерения. Например, первый продукт распада радия — эманация радия (радон) уменьшает свою активность на половину за 3,83 дня, но если речь идет о радии, то непосредственный способ измерения периода полураспада становится абсолютно невозможным. Нельзя же представить себе эксперимент, затянувшийся на 1600 лет! На помощь нам приходит явление так называемого «радиоактивного равновесия».

Если эманацию радия не изолировать от материнского вещества (радия), то подметить уменьшение радиоактивности с течением времени не удается: вместо исчезающих атомов радона возникает равное количество других атомов радона из распадающихся атомов радия. Словно в задаче на бассейны: через кран $A$ из бассейна вытекает такое-то количество ведер воды в минуту, а через кран $B$ в бассейн вливается такое же количество воды, и уровень в бассейне остается без изменения.

Если $\lambda_1$ есть радиоактивная постоянная радия и $N_1$ — общее число атомов радия в данной порции вещества, то ежесекундная убыль атомов радия будет $\lambda_1 N_1$; таково же будет число вновь образующихся атомов радона. С другой стороны, если радиоактивная постоянная радона $\lambda_2$, то из $N_2$ имеющихся в данный момент атомов радона будет исчезать $\lambda_2 N_2$ атомов.

При равновесии $\lambda_1 N_1 = \lambda_2 N_2$,

или

$$\frac{N_2}{N_1} = \frac{\lambda_1}{\lambda_2}.$$

Радиоактивная постоянная радона может быть определена, как мы говорили, экспериментально. Величину $\frac{N_2}{N_1}$ тоже легко определить как отношение количества эманации, находящейся в равновесии с данным количеством радия, а следовательно, можно будет вычислить и радиоактивную постоянную радия.

Правда, вследствие незначительности количества образующейся эманации описанный метод не очень точен. В настоящее время известны более точные методы. Остроумные комбинации счетчиков заряженных частиц позволяют подсчитывать огромное число частиц, испускаемых радиоактивным элементом в секунду.

Например, 1 *г* радия испускает в секунду $3{,}7 \cdot 10^{10}$ $\alpha$-частиц. В одном грамм-атоме радия содержится, как известно, $6 \cdot 10^{23}$ атомов (число Авогадро). Следовательно, в 1 *г* радия ($^{226}_{88}$Ra) заключено $\frac{6 \cdot 10^{23}}{226} = 2{,}7 \cdot 10^{21}$ атомов.

Отсюда

$$\lambda_2 = \frac{3{,}7 \cdot 10^{10}}{2{,}7 \cdot 10^{21}} = 1{,}37 \cdot 10^{-11} \text{ } сек^{-1},$$

и

$$T = \frac{0{,}693}{1{,}37 \cdot 10^{-11}} = 5 \cdot 10^{10} \text{ } сек = 1600 \text{ лет.}$$

Период полураспада характеризует долговечность того или иного радиоактивного вещества. Какова же продолжительность жизни отдельного атома?

Как мы уже выяснили, речь может идти лишь о вероятностной средней продолжительности жизни атомов данного вещества вообще. Попытаемся дать понятие о том, как эта статистическая величина подсчитывается.

По закону радиоактивного распада за некоторый промежуток времени $dt$ распадается некоторое число атомов $dN = N\lambda dt$, где $N$ — число еще не распавшихся атомов. От «начала» своего существования эти атомы прожили в общей сумме $tN\lambda dt$ *сек*. Наступление момента гибели различных малых порций $dN$, выделенных из данного образца, как мы знаем, раз-

лично и зависит от случая. Чтобы найти суммарную продолжительность жизни всех атомов взятого образца, надо сложить бесконечное число различных жизней бесконечно малых выделенных групп. Арифметика здесь бессильна, задача решается путем интегрального исчисления (см. беседу «Немного высшей математики»). Надо найти интеграл в пределах от $t = 0$ до $t = \infty$, ибо некоторые атомы распадутся сейчас, а другие просуществуют бесконечно долгое время ($\int_0^\infty tN\lambda dt$). Это и будет суммарная продолжительность различных периодов существования (от 0 до $\infty$) различных атомов, составляющих данный образец радиоактивного вещества. Разделив же ее на число всех атомов, бывших до начала распада, т. е. на $N_0$, мы и получим среднюю продолжительность жизни атома. Обозначим ее буквой $\tau$ (греч. буква «тау»):

$$\tau = \frac{\int_0^\infty tN\lambda dt}{N_0}.$$

Читателям, незнакомым с приемами интегрирования, придется поверить нам на слово, что результат интегрирования будет:

$$\tau = \frac{1}{\lambda}.$$

Средняя продолжительность жизни атома обратно пропорциональна вероятности его распада.

Сопоставляя выведенную формулу средней продолжительности жизни с формулой периода полураспада $T = \frac{0{,}693}{\lambda}$, можем записать:

$$T = 0{,}693\tau,$$

или

$$\tau = \frac{T}{0{,}693} \approx 1{,}5\,T.$$

Средняя продолжительность жизни атома приблизительно в полтора раза больше периода полураспада.

Таким образом, продолжительность жизни атома радия получится равной 2400 лет, урана — 6,75 млрд. лет и т. д.

Мы все время говорим о радиоактивных элементах, а что сказать о жизни стабильных элементов? Распадаются они или нет? К сожалению, в нашем распоряжении нет данных для ответа на этот вопрос. Единственно, что мы можем утверждать, что стабильность (устойчивость) элемента связана с его атомной массой и строением ядра. Увеличение числа нуклонов в ядре приводит к тому, что электрические силы отталкивания

одноименных зарядов (протонов) начинают преобладать над ядерными силами, удерживающими их в ядре. Вот почему первые открытые на Земле радиоактивные элементы относятся к наиболее тяжелым по атомной массе, занимающим последние места в периодической таблице элементов. Из природных элементов последним в таблице был уран, занимающий 92-е место. Полученные в лабораториях трансурановые элементы все радиоактивны и так недолговечны, что в природе не обнаруживаются.

Последним из стабильных, наиболее тяжелых элементов до недавнего времени считался висмут $^{209}_{83}Bi$. Однако сейчас доказано, что и он $\alpha$-радиоактивен, обладая огромным периодом полураспада — $2 \cdot 10^{17}$ лет.

Что касается элементов, следующих за ураном, то их к настоящему времени открыто двенадцать. Последний, 104-й элемент курчатовий был открыт в 1964 г. сотрудниками Объединенного института ядерных исследований в Дубне. Атомная масса 260, время жизни 0,3 *сек*.

**Определение возраста горных пород и возраста планеты.** Исследование радиоактивного распада веществ, включенных в горные породы, позволяет определить возраст последних. Перед глазами ученого как бы «радиоактивные часы», измеряющие отдаленные эпохи жизни нашей планеты. Задача сводится к определению соотношения между содержащимися в горных породах и минералах радиоактивными веществами и продуктами их распада.

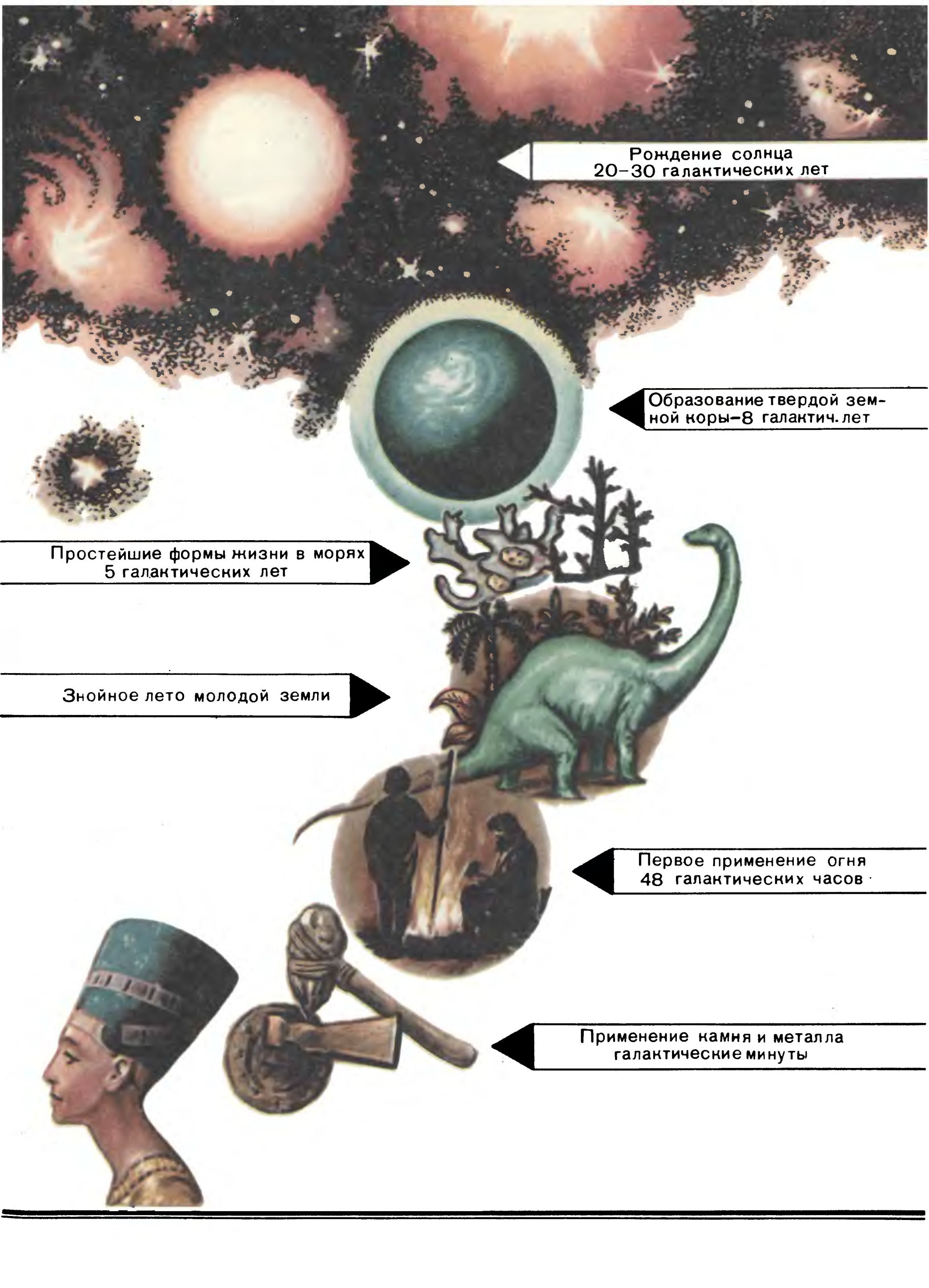
Так, например, если измерить количество урана в образце минерала уранита и одновременно количество всегда присутствующего в нем свинца как конечного продукта радиоактивного распада урана, то можно будет сделать заключение о возрасте взятого образца. Если бы нашелся такой образец минерала, что количества урана и свинца в нем были бы равны, то естественно было бы заключить, что возраст образца равен периоду полураспада, т. е. 4,5 миллиарда лет.

Кроме такого «свинцового» метода определения возраста горной породы, применяются также «гелиевый» и «аргонный» методы, основанные на нахождении в минералах этих продуктов радиоактивного распада.

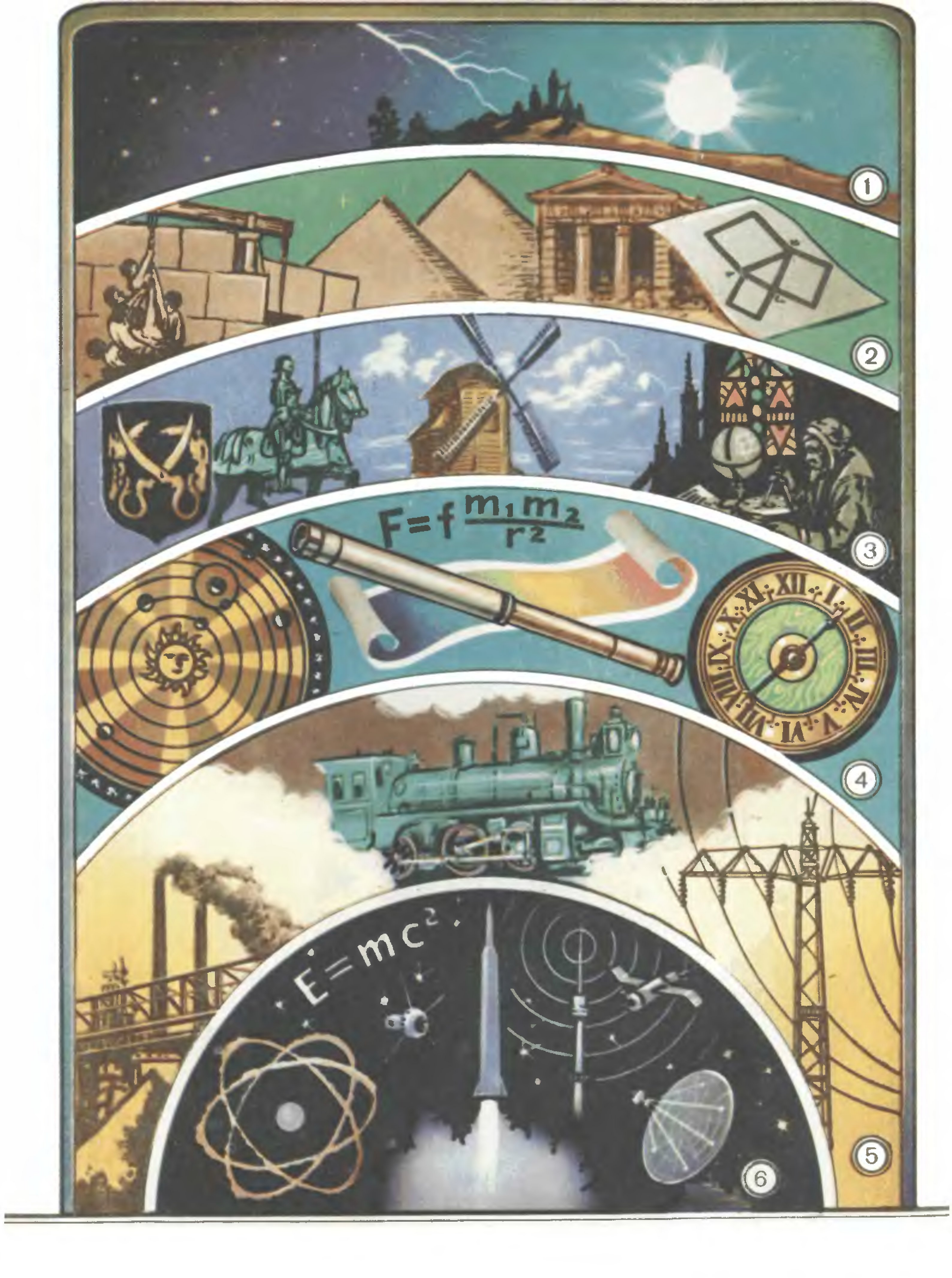
Применение всех этих методов позволило ученым оценить возраст нашей планеты примерно в 5—6 миллиардов лет. Этот результат близко совпадает с тем, который дает геология.

Весьма интересно применение радиометрических методов в археологии для оценки возраста различных древних останков, находимых при раскопках. Один из таких методов носит название «радиоуглеродного метода», так как он состоит в определении стадии распада радиоактивного углерода $^{14}_{6}C$.

Применяя этот метод, удалось определить, что возраст куска дерева от палубы погребальной ладьи египетского фараона




К статье «Этапы развития физики на масштабной сетке мировой истории».




**К статье «Этапы развития физики на масштабной сетке мировой истории»:**

**1. Древнейшие люди. Эмпирическое накопление знаний о явлениях природы. 2. Рабский труд. Греческое искусство и философия. 3. Темная ночь средневековья. Схоластика. 4. XVI—XVII вв. Зарождение экспериментальной физики. 5. Промышленный переворот. Использование пара и электричества. 6. Наши дни. Новейшая физика.**

Сезостриса III оценивается в 3620 ± 180 лет; образцы кипариса и акации из гробницы Снефру и Джосера имеют возраст 4600 лет, останки гигантского ленивца, найденные в гипсовой пещере в штате Невада (США), оцениваются давностью в 10 500 лет, остатки органической краски доисторической живописи в пещере Ласко (во Франции) отделены от нашего времени периодом в 15 600 лет.

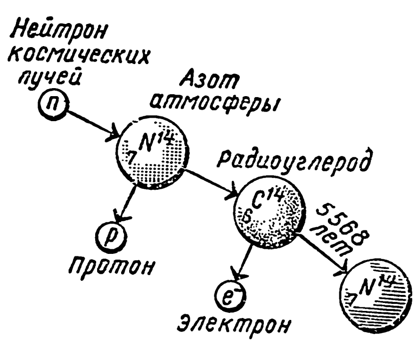



Рис. 129. Радиоактивное равновесие.

Как же были получены эти изумительные цифры? Во всех приведенных примерах фигурировали предметы органического происхождения. Одним из непременных членов в строении органических веществ является углерод. Он встречается в них в виде смеси трех изотопов: $^{12}_{6}C$ (98,9%), $^{13}_{6}C$ (1,1%) и $^{14}_{6}C$ (почти невесомое количество). Только последний является радиоактивным (с периодом полураспада 5568 лет).

В течение жизни растения или животного радиоактивное равновесие $^{14}_{6}C$ поддерживается за счет постоянного пополнения из атмосферного воздуха. В атмосфере же радиоактивный углерод появляется при действии космических лучей на азот воздуха (см. схему рис. 129).

Химические свойства радиоактивного изотопа $^{14}_{6}C$ те же, что и обычного углерода. Соединяясь с кислородом, он окисляется до углекислого газа $CO_2$ и в таком виде поглощается растениями, а через них и животными.

Так как живой организм постоянно поглощает и выделяет углерод, то в нем поддерживается некоторое постоянное количество радиоактивного углерода, причем наблюдается постоянная скорость распада — 15,3 распада в минуту; эта скорость не зависит ни от долготы, ни от широты обитания, ни от других условий жизни животного или растения.

Когда же организм умирает, приток радиоактивного углерода из атмосферного воздуха прекращается и вследствие непрерывно происходящих β-распадов количество $^{14}_{6}C$ постепенно убывает по экспоненциальному закону. По остаточной радиоактивности можно определить, сколько времени прошло с момента смерти организма. Для этого исследуемый образец обугливают и уголь наносят на внутреннюю поверхность счетчика Гейгера. При этом необходимо учесть и обычный «космический фон», создаваемый космическими лучами, проникающими в лабораторию. Фон можно исключить, применяя систему нескольких счетчиков.

## «ШАБАШ ВЕДЬМ» И СТАТИСТИКА

Внимание туриста, посетившего городское кладбище в Вене, невольно привлечет могила-памятник, украшенная бюстом из белого мрамора работы скульптора Амброзио с выгравированной на камне непонятной для нефизика математической формулой

$$S = k \ln W.$$

Чья это могила и что это за таинственные знаки? Здесь покоится прах основателя статистической физики Людвига Больцмана (1844—1906), а лаконичная формула суммирует величайшее открытие знаменитого австрийского физика — открытие основного закона природы, определяющего направление всех физических процессов, стремящихся к равновесию как наиболее вероятному состоянию.

$S$ — «энтропия», т. е. мера достижения системой равновесия, $W$ — вероятность состояния системы: энтропия прямо пропорциональна вероятности состояния. Коэффициент пропорциональности $k$ получил название «постоянной Больцмана» — это одна из универсальных постоянных, хорошо известная физикам. В дальнейшем мы постараемся разъяснить вам смысл и значение этого фундаментального закона.

И подумать только! За, казалось бы, сухой, лаконичной математической формулой стоит история страстной борьбы ученого-материалиста против идеализма, борьбы, приведшей Больцмана к преждевременному трагическому концу.

**Краткие биографические сведения.** Жизнь Больцмана небогата внешними событиями. Сын достаточно обеспеченных родителей, окруженный заботой любящей матери, мальчик прилежно и хорошо учился в гимназии, рано стал проявлять любовь к природе, составлял гербарии, собирал бабочек. По окончании гимназии поступил в Венский университет, где слушал лекции физика Стефана (мы встретим это имя в дальнейших беседах). В 1866 г. Больцман оканчивает университет и уже в следующем году становится ассистентом профессора Стефана. Дружеские отношения с профессором Стефаном и приват-доцентом Лошмидтом Больцман поддерживает и в дальнейшем, куда бы ни забросила его судьба. Через два года он уже занимает самостоятельную кафедру математической физики в университете в г. Граце — это наиболее продолжительный и наиболее спокойный период в его биографии.

Мировая известность Больцмана как физика-теоретика растет, и в 1890 г. он получает приглашение на должность профессора теоретической физики в Мюнхене, а когда в 1896 г. умер Стефан, Больцман возвращается в свой родной город Вену и в качестве преемника Стефана занимает кафедру теоретической физики.

Скоро, однако, Больцману пришлось пожалеть, что он покинул Мюнхен: в Вене обстановка была уже не та, что в пору его юности. Профессором философии в Венском университете в 1895 г. стал известный австрийский физик Эрнст Мах. Тот самый Мах, идеалистическую философию которого подверг убийственной критике В. И. Ленин в своем произведении «Материализм и эмпириокритицизм».

Мах считал, что в основе всех явлений мира лежат наши ощущения. Не вещи, а ощущения цвета, звука, давления, пространства, времени суть настоящие «элементы мира». Бесполезно и ненаучно искать причину этих ощущений, говорил он. Задача физики — открывать лишь закономерную связь между ощущениями.

Таким образом, не материя, а наше сознание является, согласно такой философии, основным. Атомы и молекулы не могут быть непосредственно наблюдаемы («А кто их видел?» — иронически спрашивал Мах), а потому являются призраками, не заслуживающими научного исследования. Картину хаотически мечущихся в бешеной пляске молекул, как ее рисует кинетическая теория газа, Мах презрительно называл «шабашем ведьм»*.

Студентам физического факультета было трудно всерьез воспринимать лекции Больцмана по молекулярно-кинетической теории газов в то время, когда параллельно этим лекциям Мах, пользовавшийся огромным авторитетом как ученый и как философ, отрицал реальность невидимых атомов и молекул. Весьма впечатлительный по натуре, Больцман очень страдал от создавшейся обстановки и от отношения окружающих, смотревших на него как на реакционера. Поэтому он охотно принял предложение опять приехать в Германию, и в 1900 г. он становится профессором физики в Лейпцигском университете. Но здесь, по горькой иронии судьбы, он сталкивается с Вильгельмом Оствальдом — представителем энергетизма — идеалистического течения, подобного махизму.

В то время как материалисты рассматривают энергию только в неразрывной связи с носителем ее — материей, энергетики (Оствальд и его последователи) считали, что все явления в мире можно подвести под понятие одной энергии, совершенно отбросив материю как объективную реальность. По утверждению Оствальда, молекулы и атомы, о которых рассказывал студентам Больцман, можно будет найти только в пыли архивов. В учебнике химии, написанном Оствальдом, совершенно не встречались эти понятия. Вот содержание одного места этого

---

* Шабаш — в средневековых поверьях — собрание ведьм в ночь под 1 мая («Вальпургиева ночь») на горе Брокен. Гете в своем «Фаусте» дает поэтическое описание этого народного поверья. Мах и Оствальд использовали образ дикой оргии сказочных призрачных ведьм как пародию на молекулярно-кинетическую картину состояния газа по Больцману.

учебника (книга написана в форме диалога между учителем и учеником): ученик высказывает предположение, что все закономерности изменения вещества в природе должны объясняться какими-то скрытыми от наших глаз причинами. «Так! — иронически восклицает учитель, — ну, знаешь, эта чисто ребяческая мысль напоминает мне анекдот о крестьянине, который, когда ему объяснили устройство локомотива, сказал: все это я хорошо понял, но где собственно спрятана лошадь, которая везет вагон?». Такой «спрятанной лошадью» казались энергетику Оствальду атомы химиков. Только в 1908 г. под давлением бесспорных экспериментальных доказательств Оствальд вынужден был признать существование атомов.

Увы, поздно!

Жизнь в Лейпциге становилась для Больцмана все более и более невыносимой. Предложение переехать в Берлин он отклонил: слишком раздражал его строгий чиновничий формализм прусской столицы. Член многих академий, всемирно известный ученый, почетный доктор Оксфордского университета, Больцман чувствовал себя чужаком в этом мире. Порой впадал он в состояние духовной депрессии и, несмотря на свой жизнелюбивый, полный добродушного юмора характер, все чаще и чаще погружался в долгое, угрюмое молчание.

Чрезмерный напряженный труд надорвал его здоровье: Больцману начало казаться, что умственные силы его стали угасать, и 5 сентября 1906 г. он кончает жизнь самоубийством.

**Основное уравнение кинетической теории газов.** Теперь мы приглашаем читателя последовать за нами в тот мир беспорядка и хаоса, который Мах презрительно называл «шабашем ведьм», в мир газообразного состояния вещества.

Знаете ли вы, что и само слово «газ» происходит от слова «хаос»? Этот термин был введен в употребление голландским химиком и врачом Ван-Гельмонтом в 1640 г. До него был известен только один вид газообразных тел — воздух. Только Ван-Гельмонт впервые обратил внимание на отличие воздуха от других газов. Он различал «лесной газ», который теперь называется углекислым, и «сухой газ» — объединенное название различных горючих газов. Конечно, Ван-Гельмонт не имел даже отдаленного представления об атомах или о молекулах, напоминающего наши современные понятия о них. Но, как видите, слово «газ» весьма метко характеризует состояние вещества с хаотическим движением его частиц. Вот уж поистине невзначай, а кстати!

Отказываясь признавать реальное существование атомов и молекул, Мах, Оствальд и их последователи основывали свои возражения на том, что такие частицы никому еще не удавалось видеть. Но действительно ли атомы и молекулы недоступны нашему восприятию? Конечно, если говорить о непосредственном восприятии, основанном только на наших ощущениях без использования современных приборов и экспериментальных средств

электронной и атомной техники, то нам доступны только неясные, суммарные проявления некоторой скрытой сущности. Погружая опрокинутый вверх дном «пустой» стакан в воду, мы обнаруживаем, что в действительности место в нем уже занято, — вода не может заполнить стакан. В стакане находится воздух, имеющий определенный объем. Такими же, только гигантских размеров опрокинутыми стаканами являются железные газгольдеры, плавающие в водяном бассейне.

Итак, объем $V$ является первой характеристикой, или параметром, газа. Со времен Торричелли, Паскаля, Бойля никто не сомневается и в другой характеристике газа — давлении $p$, производимом газом на стенки сосуда. Бойль доказал (1662 г.), что между этими двумя параметрами существует простая функциональная зависимость — обратная пропорциональность (рис. 130).

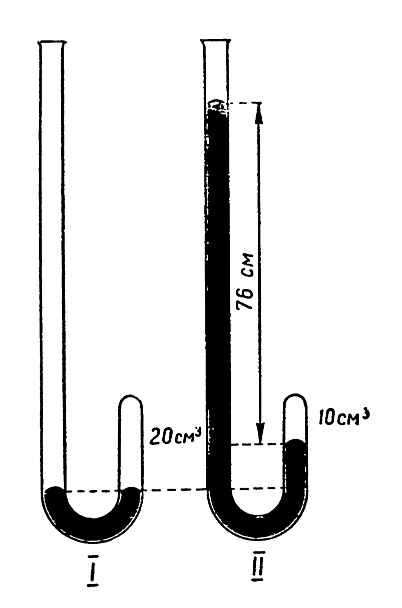
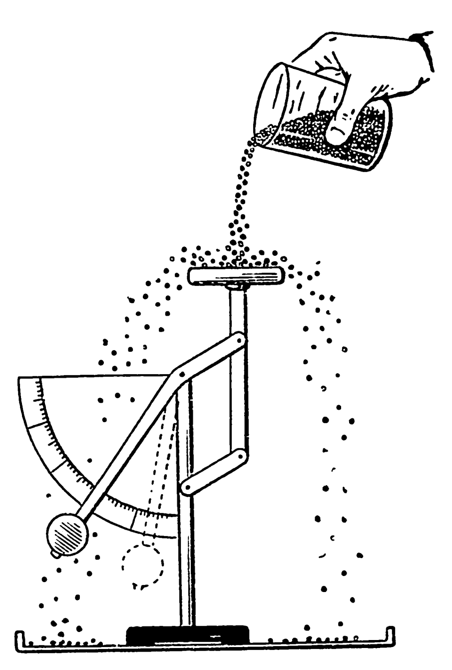


Рис. 130. Опыт Бойля.

Независимо от Бойля Мариотт (1676 г.) пришел к такому же выводу, но дал существенное уточнение, что обратная пропорциональность объема и давления соблюдается только при сохранении постоянной температуры. Температура, таким образом, является третьим параметром газового состояния.

При нормальных условиях (0° C и 760 *мм рт. ст.*) в одном кубическом сантиметре любого газа содержится 27 000 000 000 000 000 000 ($2{,}7 \cdot 10^{19}$) молекул (число


Рис. 131. Модельный опыт, выясняющий понятие давления газа.

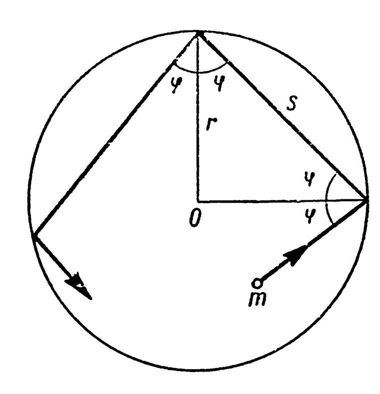


Рис. 132. К выводу уравнения кинетической теории газа.

Лошмидта), хаотически мечущихся в различных направлениях со скоростями, сравнимыми со скоростями артиллерийских снарядов. О том, как это узнали, как подсчитали число молекул, как определили их скорости, было рассказано в I части наших «Бесед» (в статье «В мире молекул»). Здесь же мы покажем, как, применяя статистический метод, можно вывести формулу давления газа и установить основные уравнения кинетической теории газов. Что метод исследования должен быть статистическим, вам, конечно, понятно, так как массовость (огромное число молекул) и хаотичность — два непременных условия применения статистики — здесь налицо.

Давление газа можно связать со средней силой, действующей на единицу поверхности сосуда в результате ударов молекул о стенку сосуда.

Следующий модельный опыт (рис. 131) выяснит физическую сущность такого понимания давления газа. Будем сыпать с некоторой высоты дробь на площадку весов для писем. Каждая дробинка действует при падении на площадку с некоторой силой и отскакивает обратно или скатывается. Так как на площадку падают все новые и новые дробинки, то стрелка весов отклоняется на некоторый угол, как если бы на площадку действовала постоянная сила. Если на площадку сыпать больше дроби или с большей высоты, то показание весов увеличится.

Так и в сосуде с газом. Мы не можем вычислить силу удара отдельной, случайной молекулы о стенку сосуда, но нетрудно вычислить среднюю силу, возникающую при ударах множества молекул, если известны скорости молекул, масса и число молекул, ударяющих в площадку в 1 *сек* (все величины при этом понимаются статистически).

Выведем теперь формулу давления газа. Предположим для простоты, что газ заключен в шарообразный сосуд радиусом $r$ (доказательство может быть проведено и для сосуда любой другой формы). Не будем принимать в расчет столкновений молекул газа друг с другом. При этом молекулы (подобно упругим шарам) обмениваются импульсами.

Когда упругий шарик (молекула) ударяет по перпендикулярному направлению в стенку, то он отражается обратно с той же скоростью. Скорость $u$ превращается в $-u$, а импульс $mu$ в $-mu$, т. е. импульс испытывает изменение $-mu - mu = -2mu$. Так как это изменение импульса молекулы вызвано взаимодействием со стенкой, то можно сказать на основании

закона действия и противодействия, что и на стенку подействовал импульс $2mu$.

В случае если удар произошел под углом $\varphi$, то надо учитывать только перпендикулярную к стенке составляющую этого импульса, тогда изменение импульса равно $2mu \cos \varphi$.

Отразившись от стенки, молекула летит по некоторой хорде (рис. 132), длина которой $s$, как видно из рисунка, равна $2r \cos \varphi$.

Продолжительность полета от одного соударения до другого

$$t = \frac{s}{u} = \frac{2r \cos \varphi}{u},$$

а число соударений в секунду

$$N = \frac{1}{t} = \frac{u}{2r \cos \varphi}.$$

Отсюда сумма импульсов в секунду для одной молекулы

$$2mu \cos \varphi \frac{u}{2r \cos \varphi} = \frac{mu^2}{r}.$$

Для $n$ молекул это составит*:

$$\frac{nmu^2}{r}.$$

Тогда давление $p = \frac{F_{ср}}{S}$ ($F_{ср}$ — изменение импульса в секунду, $S$ — площадь поверхности шара) будет равно:

$$p = \frac{nmu^2}{r} : 4\pi r^2 = \frac{nmu^2}{4\pi r^3}.$$

Знаменатель в этой формуле представляет утроенный объем шара ($V = \frac{4}{3} \pi r^3$). Следовательно, формулу давления можно представить в таком виде:

$$p = \frac{nmu^2}{3V},$$

откуда

$$pV = \frac{nmu^2}{3}.$$

Преобразовав правую часть, получим:

$$pV = \frac{2}{3} n \frac{mu^2}{2}.$$

Здесь $\frac{mu^2}{2}$ выражает среднюю кинетическую энергию молекулы.

* Временно мы полагаем, что все молекулы имеют одинаковую скорость. Уточнение будет сделано ниже.

Таким образом,

$$pV = \frac{2}{3} n\varepsilon,$$

где

$$\varepsilon = \frac{mu^2}{2}.$$

Для одного моля газа

$$pV = \frac{2}{3} N_A \frac{mu^2}{2} \text{ } (N_A \text{ — число Авогадро}).$$

Поскольку правая часть при идеальной упругости молекул остается постоянной при неизменной температуре, то отсюда непосредственно получается закон Бойля — Мариотта:

$$pV = \text{const}.$$

Если газ нагревать, т. е. подводить энергию извне, то его внутренняя энергия должна увеличиваться. Для идеального газа, между молекулами которого не действуют силы взаимного притяжения, внутренняя энергия — это кинетическая энергия его молекул. Как известно, она пропорциональна абсолютной температуре газа: $\frac{mu^2}{2} = LT$ ($L$ — коэффициент пропорциональности). Следовательно, можно предыдущее равенство переписать в виде:

$$pV = \frac{2}{3} N_A LT,$$

или

$$\frac{pV}{T} = \frac{2}{3} N_A L = \text{const} = R,$$

т. е. мы получаем уравнение состояния газа, связывающее все три параметра $p$, $V$, $T$:

$$\frac{pV}{T} = R.$$

Постоянная $R$ называется универсальной газовой постоянной (для моля газа). $^2/_3\, L$ обозначается буквой $k$ и называется постоянной Больцмана; очевидно, что ее размерность *эрг/град* или *дж/град*. Измерения показали, что

$$k = 1{,}380 \cdot 10^{-16} \text{ эрг/град} = 1{,}38 \cdot 10^{-23} \text{ дж/град}.$$

Из обозначения $k = \frac{2}{3} L$ следует $L = \frac{3}{2} k$, или

$$\frac{mu^2}{2} = \frac{3}{2} kT,$$

а из равенства $\frac{2}{3} LN_A = R$ можно написать $\frac{2}{3} L = k = \frac{R}{N_A}$. Иначе говоря, постоянную Больцмана можно определять как газовую постоянную, отнесенную к одной молекуле.

Исключительно важным следствием статистического анализа кинетической теории газов является то, что он позволил уточнить понятие такой важной физической величины, как температура.

Характеристика интенсивности хаотического движения множества молекул и представляет собой физическую величину — температуру, выраженную в единицах энергии.

Обозначим температуру, выраженную в единицах энергии, $\Theta$ (греческая буква «тэта»), а обычную температуру, выраженную в градусах шкалы Кельвина, $T$, тогда связь между ними можно будет представить формулой $\Theta = kT$, где $k$ и есть постоянная Больцмана.

Как видите, температуру можно выражать или в градусах, или в любых единицах энергии. Но исторически сложилось так, что градусное выражение температуры возникло задолго до того, как была разработана молекулярно-кинетическая теория и статистическое понятие температуры.

Отметим также, что выражение температур, с которыми мы имеем дело в жизни и в технике, в единицах энергии было бы малоудобным. Ведь даже такая малая единица, как эрг, слишком велика по сравнению с градусом: 1 *эрг* $= 7{,}28 \cdot 10^{15}$ ° К (1° К $= 1{,}38 \cdot 10^{-16}$ *эрг*). Что же бы тогда получилось? Температура таяния льда (0° С или 273° К) соответствовала бы энергии молекул в $5{,}65 \cdot 10^{-14}$ *эрг*. Даже температура в 100 миллионов градусов, получаемая при атомном взрыве, оценивалась бы всего в $2 \cdot 10^{-8}$ *эрг* на одну молекулу!

Обратите особенное внимание на то, что температура — понятие статистическое. Поэтому нельзя говорить о температуре одной или небольшого числа молекул. В межпланетном пространстве космоса количество молекул в единице объема (плотностное распределение) настолько незначительно, что нельзя применять законы статистики, и в этом случае не приходится говорить о средней энергии молекул: ведь то, что является случайностью для одной молекулы, становится закономерностью только для большого числа их.

Не имеет смысла прежнее понятие температуры и для системы, сильно отличающейся от равновесного состояния. Например, в применении к плазме, как сильно ионизированному газу, состоящему из электронов, ионов и нейтральных частиц, приходится одновременно говорить о трех различных температурах: об электронной, ионной и атомной. Самая большая из них — электронная, она обычно достигает десятков тысяч градусов, в то время как температура ионов и нейтральных атомов и молекул около двух-трех тысяч градусов.

**Скорости газовых молекул. Распределение Максвелла.** При выводе основного уравнения молекулярно-кинетической теории мы принимали, что скорость всех молекул одна и та же. Конечно, это не так, в бесконечном хаосе молекулярно-кинетической картины различные молекулы имеют самые различные скорости.

Но наш вывод останется справедливым, если мы искусственно припишем всем молекулам некоторую одинаковую среднюю скорость. Но что считать средней скоростью? В формуле $\varepsilon = \frac{mu^2}{2}$, выражающей среднюю кинетическую энергию молекулы, очевидно, и для скорости должно быть взято некоторое усредненное значение. Очевидно, чтобы вычислить квадрат такой средней скорости (ее обозначают обычно буквой $c$), нужно сложить квадраты скоростей отдельных молекул и разделить на число всех молекул:

$$c^2 = \frac{u_1^2 + u_2^2 + \ldots + u_n^2}{n}.$$

Отсюда

$$c = \sqrt{\frac{u_1^2 + u_2^2 + \ldots + u_n^2}{n}}.$$

Скорость, определенная таким образом, называется средней квадратичной скоростью.

Если бы мы находили среднюю скорость, не прибегая к возведению в квадрат, т. е. нашли

$$u = \frac{u_1 + u_2 + \ldots + u_n}{n},$$

то это была бы средняя арифметическая скорость. Она не равна средней квадратичной. В этом нетрудно убедиться на простом примере: пусть скорости трех отдельных молекул равны 2, 4, 6 *м/сек*,
тогда

$$u = \frac{2 + 4 + 6}{3} = 4 \text{ м/сек},$$

а

$$c = \sqrt{\frac{4 + 16 + 36}{3}} \approx 4{,}2 \text{ м/сек}.$$

То, что мы ввели в рассмотрение среднюю арифметическую и среднюю квадратичную скорости, не означает, что с этими скоростями движется большинство молекул. Ведь если у нас в СССР средняя продолжительность жизни 70 лет, то это ведь не означает, что в составе населения преобладают старики.

Теория вероятностей позволяет определить такую среднюю скорость, с которой движется большинство молекул данного объема газа. Эта скорость называется наивероятнейшей. Обозначим ее $c_н$. Она несколько меньше средней арифметической, а последняя, как мы видели, в свою очередь меньше средней квадратичной.

Именно к средней квадратичной скорости относятся приводимые в учебниках данные о скоростях движения молекул некоторых газов при 0° С:

| | |
|---|---|
| Водород . . . . . . . . . . . | 1845 *м/сек* |
| Кислород . . . . . . . . . . . | 461 » |
| Азот . . . . . . . . . . . . . | 493 » |
| Углекислый газ . . . . . . . | 393 » |

О том, как велики эти скорости движения молекул газа, вы составите себе представление, если вспомните скорости, достигнутые человеком в современной технике:

| | |
|---|---|
| Поезд метрополитена . . . | 20 *м/сек* |
| Автомобиль «Волга» . . . . | 36 » |
| Самолет ИЛ-18 . . . . . . | 180 » |
| Пуля . . . . . . . . . . . . | 860 » |
| Космическая ракета . . . | 8000 » |

Скорости, определенные для молекул, являются величинами статистическими. Не имеет смысла говорить о скорости одной молекулы. Нельзя, например, задать такой вопрос: сколько молекул в данном объеме в данный момент имеет скорость 461 *м/сек*? Вследствие случайного, беспорядочного характера движения может случиться, что ни одна молекула не имеет такой скорости. Можно говорить лишь о вероятном числе молекул, обладающих скоростями в каком-нибудь интервале, например между 400 и 500 *м/сек*. Обычно число молекул выражают в долях или процентах от общего числа молекул $N$, т. е. в виде $\frac{\Delta N}{N\Delta c}$, где $\Delta c$ — интервал скоростей.

Рассмотрите таблицу распределения молекул кислорода по скоростям при 0° С.

| Интервал скоростей, *м/сек* | Доля молекул от общего числа, % |
|---|---|
| Меньше 100 | 1,4 |
| 100—200 | 8,1 |
| 200—300 | 16,7 |
| 300—400 | 21,5 |
| 400—500 | 20,3 |
| 500—600 | 15,1 |
| 600—700 | 9,2 |
| Больше 700 | 7,7 |

Вы замечаете, что наибольшее число молекул приходится на сравнительно узкую область со средними скоростями 300—500 *м/сек*, а молекул с очень большими и очень малыми скоростями немного.

Перенесем данные этой таблицы на график (рис. 133), откладывая интервалы скоростей $\Delta c$ через 100 *м/сек* по оси абсцисс, а по оси ординат величины $\frac{\Delta N}{N\Delta c}$. Вертикальные столбики (площади прямоугольников) будут изображать тогда доли молекул (от общего числа), приходящиеся на соответствующие интервалы скоростей.

Если делать интервалы все меньше и меньше, то наша ступенчатая диаграмма будет стремиться к плавной кривой, изображенной на рисунке пунктиром.

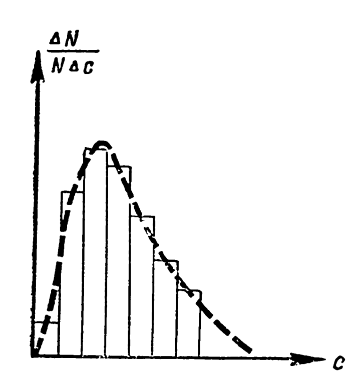


Рис. 133. К распределению Максвелла.

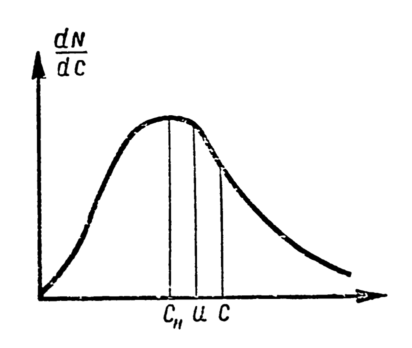


Рис. 134. Кривая распределения. Наивероятнейшая, средняя и средняя квадратичная скорости.

Переходя к пределу, как это делается в дифференциальном исчислении, мы получим вместо отношения $\frac{\Delta N}{\Delta c}$ дифференциальное выражение некоторой функции от $c$, т. е. $\frac{dN}{dc} = f(c)$. График этой функции, показывающий распределение молекул по скоростям, изображен на рисунке 134. На графике вы можете найти скорости $c_н$, $u$ и $c$, но не забудьте только, что по оси абсцисс отложены скорости. Максимум кривой распределения соответствует наивероятнейшей скорости, т. е. скорости большинства молекул.

Аналитическое выражение функции распределения скоростей молекул (при помощи формулы) было дано Максвеллом и затем уточнено Больцманом на основе теории вероятностей и статистики. Вывод этой формулы очень сложен, поэтому мы ее приводим в готовом виде:

$$f(c)\,dc = N4\pi \left(\frac{m}{2\pi kT}\right)^{\frac{3}{2}} e^{\frac{-mc^2}{2kT}} c^2\,dc.$$

Вычисленные по этой формуле значения расположатся на рассмотренной нами кривой распределения.

Об экспериментальном подтверждении закона распределения скоростей Максвелла говорится в школьных учебниках физики при описании опыта Штерна (см. также «Беседы по физике», ч. I, «В мире молекул»).

Прежде чем покинуть собрание хаотически мечущихся молекул, отметим, что статистика позволяет определить и число столкновений, и длину свободного пробега молекулы от одного соударения до другого. Расчеты приводят к числам, поражающим воображение. Так, число соударений в секунду для моле-

кул кислорода (при 0° С и 760 *мм рт. ст.*) оказывается равным $4{,}29 \cdot 10^9$ (четыре миллиарда столкновений в секунду!). Средний свободный пробег молекулы от одной встречи до следующей $8{,}7 \cdot 10^{-6}$ *см*. Средний потому, что встречи случайны и нельзя учесть, какое расстояние удастся пролететь данной молекуле до столкновения с другой мчащейся молекулой.

Вспомним еще, какое огромное число молекул заключается в 1 *см*$^3$ газа (27 000 000 000 000 000 000 молекул), и, учтя все, что установлено физиками относительно скоростей, столкновений и характера движения молекул, мы поймем сомнения Маха, называвшего молекулярно-кинетическую картину «ша́башем ведьм на горе Брокен». Впоследствии Мах и Оствальд под давлением неоспоримых фактов вынуждены были признать реальность молекул.

Выводы Максвелла и Больцмана легли в основу ряда других исследований молекулярной физики. Ограничимся только упоминанием таких явлений, как диффузия, теплопередача, внутреннее трение в газах (вязкость). Детально эти явления изучаются в курсах высшей школы, и мы не считаем возможным включать анализ их в наши беседы.

## ЭНЕРГИЯ И ЕЕ ТЕНЬ

В годы моего студенчества мы увлекались вышедшей в 1905 г. книгой немецкого популяризатора профессора Феликса Ауэрбаха с интригующим названием «Царица мира и ее тень». В поэтической форме в книге рассказывалось об энергии и энтропии — двух основных понятиях термодинамики. Несмотря на ложную философскую трактовку этих понятий и ложные выводы, вытекающие из нее, художественная форма и блестящий популяризаторский талант позволили автору сделать доступным для широкого круга читателей ознакомление с содержанием одной из труднейших философских проблем физики.

«Над всем, что совершается в беспредельном пространстве в потоке преходящего времени, властвует энергия, как богиня, как царица — здесь даря, там отнимая, а в общем не даря и не отнимая. Она властвует со строгой справедливостью, беспристрастно озаряя своим вечно ровным светом одинаково и былинку, и гениального человека.

Но где свет, там и тень, и тень, которую бросает властительница мира — энергия, глубока и темна, многообразна и подвижна. Эта тень как будто обладает самостоятельной жизнью, как будто пытается со своей стороны властвовать над миром, но совсем не так, как энергия. Глядя на эту тень, нельзя подавить в себе смутного страха: она злой демон, стремящийся умалить, если не совсем уничтожить все то великое, прекрасное, доброе, что создает светлый демон. Этому злому демону мы

даем название энтропии; как оказывается, она постоянно растет и медленно, но уверенно раскрывает свои злые наклонности.

Что нам до энергии, когда на Землю безостановочно надвигается ее тень, и чем дальше надвигается на Землю вечер, тем гуще становится эта тень, чтобы в конце концов окутать все глубокой тьмой».

Клаузиус на основании закона возрастания энтропии высказал гипотезу о так называемой «тепловой смерти», грозящей миру. Критике этой гипотезы посвящено много работ крупных ученых XIX столетия, среди которых следует назвать Больцмана, Смолуховского.

Энгельс в своей «Диалектике природы» (шестидесятые годы прошлого столетия) показал, к каким неприемлемым, антинаучным выводам приводит неправомерное распространение законов термодинамики на всю Вселенную в целом. Он показал, что в теории «тепловой смерти» мира скрывается внутреннее противоречие такого расширения этих законов. Вывод о тепловой смерти Вселенной есть в сущности вывод, противоречащий закону сохранения энергии, ибо, следуя закону возрастания энтропии во Вселенной, мы неизбежно приходим к заключению: «значит, количество имеющегося во Вселенной движения, или энергии, не всегда одинаково; значит, энергия должна была быть сотворена; значит, она сотворима, значит, она уничтожима. Ad Absurdum!» (До абсурда!), — восклицает основоположник диалектического материализма.

Однако оба положения: сохранение энергии и возрастание энтропии — являются основными законами термодинамики, в незыблемости которых мы так же не сомневаемся, как в незыблемости законов Ньютона в применении к макромиру.

Рассказать об основных законах термодинамики и показать их роль, значение и границы их применимости — цель настоящей беседы. Частично тому же вопросу был посвящен наш очерк в I части «Бесед», «Сади Карно и его формула».

Что такое термодинамика?

Термодинамика возникла первоначально как наука о процессах в тепловых (прежде всего, паровых) машинах. В настоящее время она далеко вышла за пределы учения о теплоте, и в современном ее состоянии она включает в себя исследования в области различных — физических, химических, биологических и даже космических — явлений. Термодинамика — это часть теоретической физики, занимающаяся изучением общих свойств вещества, связанных с тепловым движением. Однако в ее сферу не входит изучение явлений, происходящих с отдельными атомами и молекулами. Она изучает лишь явления с телами относительно крупных размеров, в которых события микромира проявляются лишь статистически.

Выводами термодинамики широко пользуется не только теплотехника, но и физика и физическая химия в различных своих применениях, как в технике, так и в естественных науках.

Исследуя явления окружающего нас мира, современная физика пользуется двумя методами теоретических обобщений: при одном из них, термодинамическом, она, опираясь на прочно установленные опытом факты, обобщает их в виде немногих (двух-трех) положений — «начал», не прибегая к каким-либо гипотезам относительно внутреннего механизма явлений, относительно скрытой сущности их. Такой метод связан в первую очередь с экспериментальными потребностями техники.

Явления микромира, мира атомов и молекул, не входят в круг объектов, интересующих термодинамику, они слишком деликатны для грубой технической жизни, включение их в расчет не принесло бы ощутимых изменений и только напрасно усложнило бы методику прикладной работы.

При другом методе, который дает нам молекулярно-кинетическая теория, мы, опираясь на добытые современным экспериментом данные, стремимся проникнуть в самую сущность изучаемого явления, пользуясь некоторыми гипотетическими положениями, число которых уменьшается по мере развития науки. Многие положения молекулярно-кинетической теории давно перестали быть гипотезой. Молекулы и атомы стали сейчас для нас полной реальностью.

Броуново движение, диффузия, движение ионов при электролизе, ионизация газов, катодные (электронные) лучи делают убедительной теорию атомно-молекулярного строения вещества даже в глазах школьника. Для ученых же вся атомная и ядерная физика и техника базируются на познании тонкой структуры материи.

Не следует думать, что термодинамика и молекулярно-кинетическая теория противостоят друг другу, взаимно исключают одна другую. Имея предметом своего исследования одну и ту же объективную реальность — материю, они взаимно дополняют друг друга.

Напомним содержание двух первых начал термодинамики в самом общем виде.

*Первое начало.* Невозможно возникновение или уничтожение энергии.

*Второе начало.* Невозможен процесс, единственным результатом которого было бы превращение теплоты в работу.

Приведенная формулировка второго начала, выбранная нами из соображений симметрии, нуждается, однако, в пояснении. Слова «единственным результатом» в этой формулировке весьма существенны. Вообще говоря, полный переход теплоты в работу возможен, и он происходит при изотермическом процессе. Допустим, газ расширяется в цилиндре с поршнем при сохранении температуры газа постоянной (изотермически). Такой процесс возможен только при подводе тепла извне. Получаемая работа поршня при этом в точности эквивалентна подведенной энергии. Однако подобный процесс не может быть практически исполь-

зован для построения тепловой машины: не может же расширение газа продолжаться неограниченно долго, ход поршня практически ограничен несколькими долями метра и в реально действующей машине поршень должен периодически возвращаться в исходное положение. Формулировка второго начала предполагает такое циклическое повторение процесса и, кроме того, исключает наличие внешнего источника тепла, хотя явно об этом не говорится.

Более уточненная формулировка второго начала термодинамики такова: «Невозможен такой периодический процесс, единственным результатом которого было бы превращение тепла в работу без того, чтобы не произошли какие-нибудь изменения в окружающих телах».

Действительно, в практически действующих тепловых машинах подводимое от теплоотдатчика (котла) тепло вызывает изменение в холодильнике, нагревает его. Без холодильника никакая тепловая машина работать не может. Иначе можно было бы надеяться использовать почти безграничные резервы внутренней энергии воды океанов, атмосферы.

Необходимость холодильника в тепловой машине приводит к такой еще формулировке: «Теплота не может сама собой переходить от менее нагретого тела к более нагретому».

В периодически действующей машине для возвращения рабочего тела (газ, пар) в первоначальное состояние часть работы, в которую превратилась теплота, полученная от нагревателя, затрачивается на работу возвращения рабочего тела в начальное состояние, и эта часть работы машины передается холодильнику (нагревает его). Таким образом «к. п. д. тепловой машины всегда меньше единицы».

Существуют и другие формулировки начал термодинамики, имеются и математические выражения их. Некоторые из них появятся в нашей беседе в дальнейшем.

Отметим, что первый закон термодинамики имеет консервативный характер; он, как бухгалтер, ведет лишь строгий учет прихода и расхода энергии. В случае малейшего отклонения от равенства, когда «баланс не сходится», необходимо еще и еще раз произвести проверку, пока не найдется «потерянная копейка». История современной физики знает не один пример, когда такие поиски приводили к новым, неожиданным открытиям.

Так, например, случилось при анализе баланса энергии так называемого β-распада радиоактивных элементов. Тогда кажущееся расхождение эксперимента с законом сохранения энергии привело к открытию новой частицы — нейтрино — с ее поразительными свойствами (см. беседу «Продолжительность жизни атома»).

Первое начало термодинамики, контролируя лишь сохранение энергии при ее превращениях, не дает нам никаких указаний, в каком направлении будут происходить превращения. Вот здесь-то решающее слово предоставляется второму началу.

Присматриваясь к явлениям окружающей нас природы, мы замечаем определенную направленность процессов, ведущую к нивелировке, выравниванию различий в состояниях — механическом (выравнивание уровней, давлений), тепловом (выравнивание температур), электрическом (выравнивание потенциалов). В горном обвале камни катятся вниз, раскаленная сталь при погружении в холодную воду остывает, а вода нагревается до установления некоторой общей температуры, аккумулятор при работе разряжается. Такие процессы нам кажутся вполне естественными, происходящими как бы сами собой. Процессы же, приводящие к увеличению различия в состояниях, оказываются вынужденными, но при внимательном анализе их мы всегда найдем, что они вызваны другими превращениями, ведущими к выравниванию и даже в большей степени, нежели нарушения в этой тенденции, произведенные вынужденными процессами.

Подъемный кран поднял, например, тонну строительного материала на высоту 10 *м*, при этом совершена работа 98 000 *дж*, но электродвигатель, обслуживавший кран, должен был для этого затратить энергии больше 98 000 *дж*, так как к. п. д. двигателя меньше 100%. Разница пошла на нагревание проводов, трение в подшипниках и другие потери. То же можно сказать и о любом природном процессе. Камни падают вниз; если же при извержении вулкана можно видеть, как из кратера вулкана выбрасываются вместе с газами, лавой и куски горной породы, то и здесь уменьшение напряжения под земной корой перекрывает процесс временного создания новой разности уровней.

Тепловые машины предназначены для превращения энергии топлива в другую энергию: механическую, электрическую или, выражаясь вообще, для превращения теплоты в работу.

Ни одна тепловая машина не использует энергию топлива полностью. Об этом и говорит приведенная выше формулировка второго начала термодинамики: тепло, заимствованное у источника, не может быть целиком превращено в работу, часть тепла должна быть передана более холодному телу.

Использовать энергию тел при низкой температуре можно только при наличии еще более низкого температурного уровня и опять-таки использовать лишь частично.

Можно отнимать тепло и у тел низкой температуры, но путем вынужденного процесса. Например, можно передавать тепло находящихся в домашнем холодильнике продуктов окружающему воздуху, но для этого необходимо затрачивать электрическую энергию на работу холодильника, и каждый владелец холодильника знает, что это стоит денег. И при этом часть электроэнергии расходуется для нас бесполезно.

Какой бы процесс мы ни рассматривали, мы всегда обнаружим, что часть энергии переходит на более низкий уровень и, таким образом, «обесценивается».

Для количественного выражения степени обесценивания энергии Клаузиус (1856 г.) ввел понятие энтропии $S$.

Теперь читателю придется преодолеть некоторые математические трудности. Без этого все рассуждение об энтропии будет слишком поверхностным.

Напомним, что вопрос о наилучшем использовании тепловых процессов в практике возник еще в первой четверти XIX столетия. Сади Карно удалось установить условия наивыгоднейшего использования тепловых двигателей*. Он показал, что к. п. д. идеального теплового двигателя выражается формулой:

$$\eta = \frac{Q_1 - Q_2}{Q_1} = 1 - \frac{Q_2}{Q_1},$$

т. е. что он всегда меньше единицы, но тем больше приближается к ней, чем меньше дробь $\frac{Q_2}{Q_1}$, в которой $Q_1$ — количество теплоты, полученной от нагревателя, а $Q_2$ — количество неиспользованного тепла, переданного холодильнику. Карно описал замкнутый цикл (ряд последовательных процессов) идеального двигателя. Этот цикл состоит из изотермического расширения газа, адиабатического расширения, изотермического сжатия и адиабатического сжатия (рис. 135). При таком сочетании изотермических и адиабатических процессов получается соотношение:

$$\frac{Q_2}{Q_1} = \frac{T_2}{T_1}, \text{ или } \frac{Q_1}{T_1} - \frac{Q_2}{T_2} = 0.$$

По совершении идеального цикла Карно рабочее вещество (газ) возвращается в первоначальное состояние, совершенно тождественное исходному, и цикл может быть повторен неограниченное число раз. Площадь, ограниченная графиком цикла, выражает величину полезной работы. Дробь $\frac{Q}{T}$, очевидно, характеризует состояние рабочего тела, и предыдущее равенство математически подтверждает, что в результате цикла никаких нарушений состояния в рабочем теле не имеется. Кроме того, изменение знаков на обратные не нарушит равенства. Следовательно, этот цикл может идти и в обратном направлении.

Цикл, соответствующий любому идеальному круговому процессу, можно представить в виде суммы бесконечно малых циклов Карно (рис. 136). Применяя символы дифференциального и интегрального исчисления, мы можем в этом случае записать:

$$\int \frac{dQ}{T} = 0.$$

---

* См. «Беседы по физике», ч. I. Очерк «Сади Карно и его формула».

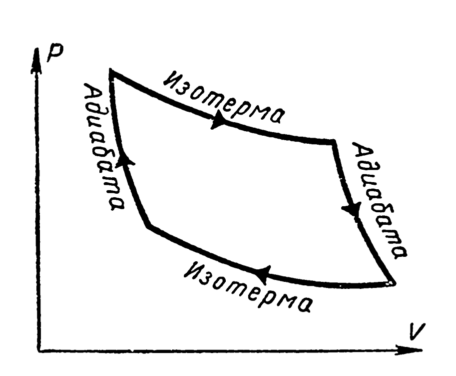




Рис. 135. Цикл Карно.

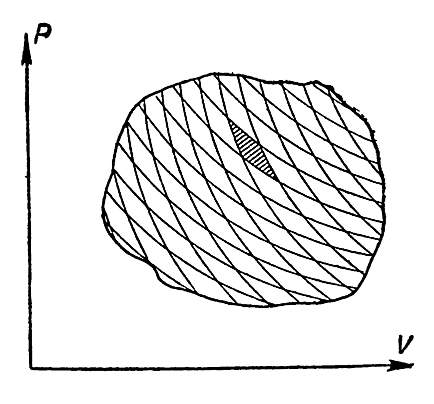



Рис. 136. Сведение любого цикла к бесконечной сумме циклов Карно.

(Напомним, что $dQ$ будет здесь символом бесконечно малого количества тепла для каждого элементарного цикла, а символ $\int$ означает суммирование бесконечного числа бесконечно малых величин.)

Клаузиус показал, что приведенное интегральное выражение дает нам возможность определить некоторую функцию состояния системы, или, вернее, разность конечного и начального состояния. Он ввел для этой функции термин «энтропия». Таким образом, для обратимого процесса, в котором не произошло никакого изменения состояния, разность энтропий в конечном и начальном состоянии равна нулю. Математически это запишем так:

$$S_{\text{к}} - S_{\text{н}} = \int \frac{dQ}{T} = 0.$$

Однако обратимый процесс — это чистейшая идеализация. В природе не бывает обратимых процессов. Ничто не проходит бесследно. Никакой процесс не может повернуть вспять и вернуть систему в начальное состояние без остающихся последствий.

— А качания маятника, например? — спросит читатель. — Что же, и качания реального физического маятника, если к нему не подводить энергию от заведенной пружины или поднятой гири, не представляют обратимого процесса: амплитуды колебаний вследствие различных потерь на трение и сопротивление воздуха становятся с каждым размахом все меньше и меньше. Реальные процессы необратимы. Газ может расширяться, если ему предоставить для этого место, но никто никогда не наблюдал, чтобы газ сам собой начал сжиматься. Точно так же никто не наблюдал, чтобы нагретая сталь, опущенная для закалки в воду, сначала охладилась, а потом стала разогреваться еще сильнее.

Формулу энтропии для необратимого (реального) процесса поэтому следует написать так:

$$S_н - S_к < 0,$$

т. е. энтропия в конце процесса больше, чем в начале. Энтропия всегда возрастает.

«Можно, — писал Клаузиус, — оба главных положения механической теории теплоты (термодинамики) сформулировать как основные законы Вселенной в следующей простой форме:

1. Энергия мира постоянна.

2. Энтропия мира стремится к максимуму».

Необратимость реальных процессов связана с неизбежным обесцениванием энергии при переходе части ее во внутреннюю энергию окружающих тел (нагревание трущихся деталей машин, излучение). Поэтому второе положение приводит к выводу о неизбежном обесценивании энергии мира и в перспективе к полному выравниванию уровней, при котором уже становятся невозможными никакие процессы.

Обладая прежней суммой джоулей и калорий, мир оцепенеет в полной неподвижности — наступит «тепловая смерть мира».

Разумеется, подобный вывод не вяжется с материалистическим мировоззрением. Приведу слова Ф. Энгельса из «Введения» к «Диалектике природы» (Политиздат, 1969, стр. 19, 21, 22):

«Может быть, пройдут еще миллионы лет, народятся и сойдут в могилу сотни тысяч поколений, но неумолимо надвигается время, когда истощающаяся солнечная теплота будет уже не в силах растапливать надвигающийся с полюсов лед, когда все более и более скучивающееся у экватора человечество перестанет находить и там необходимую для жизни теплоту, когда постепенно исчезнет и последний след органической жизни, и Земля — мертвый, остывший шар вроде Луны — будет кружить в глубоком мраке по все более коротким орбитам вокруг тоже умершего Солнца, на которое она, в конце концов, упадет. Одни планеты испытывают эту участь раньше, другие позже Земли; вместо гармонически расчлененной, светлой, теплой солнечной системы останется лишь один холодный, мертвый шар, следующий своим одиноким путем в мировом пространстве. И та же судьба, которая постигнет нашу солнечную систему, должна раньше или позже постигнуть все прочие системы нашего мирового острова, должна постигнуть системы всех прочих бесчисленных мировых островов, даже тех, свет от которых никогда не достигнет Земли, пока еще будет существовать на ней человеческий глаз, способный воспринять его...

Но здесь мы вынуждены либо обратиться к помощи творца, либо сделать тот вывод, что раскаленное сырье для солнечных систем нашего мирового острова возникло естественным путем, путем превращений движения, которые *от природы присущи* движущейся материи и условия которых должны, следователь-

но, быть снова воспроизведены материей, хотя бы спустя миллионы и миллионы лет, более или менее случайным образом, но с необходимостью, внутренне присущей также и случаю».

Ниже, когда мы перейдем к статистическому толкованию второго закона термодинамики, мы увидим, как близки эти высказывания Энгельса современной трактовке вопроса. Энгельс писал свою «Диалектику природы» в семидесятых годах прошлого столетия, когда учение об энтропии только что было создано Клаузиусом и всего через какой-нибудь десяток лет после утверждения в науке закона сохранения энергии, поэтому естественно, что еще не было фактического материала, на который он мог бы опереться.

«Мы приходим, таким образом, к выводу, что излученная в мировое пространство теплота должна иметь возможность каким-то путем, — путем, установление которого будет когда-то в будущем задачей естествознания, — превратиться в другую форму движения, в которой она может снова сосредоточиться и начать активно функционировать».

Современная наука отвергает идеалистическое учение о «тепловой смерти» Вселенной. Все достижения науки только укрепляют нашу уверенность в том, что мир бесконечен, что развитие его происходило вечно и будет вечно продолжаться.

Основная ошибка сторонников «тепловой смерти» мира заключается в неправомерном распространении закона, выведенного из опыта для ограниченной части Вселенной, доступной нам, на всю Вселенную. Попытки внести поправки в неправомерное толкование закона делались и делаются многими авторами. В той же книге Ауэрбаха мы находим такое заключение: «К счастью, существуют соображения, которые лишают перспективу ее безотрадности.

Процессы выравнивания могут происходить лишь там, где имеются различия, и чем различие больше, тем интенсивнее они происходят; чем различие меньше, тем слабее это выравнивание. Но сам же процесс выравнивания и сглаживает непрерывно различие. Таким образом, мы видим, что мировой процесс, тенденция которого открывает столь печальные перспективы, постепенно должен замедляться... Темп этого процесса будет все замедляться, и предел его лежит в бесконечной отдаленности. И бесконечное время мы можем еще пользоваться благословениями царицы мира, не смущаясь ее постоянно удлиняющейся тенью».

Действительно, второй закон термодинамики показывает лишь направление, в каком должны происходить процессы в изолированной системе. Подобно тому как не смущает нас бесконечное необратимое течение времени, так совершенно спокойно должны мы относиться и к тенденции возрастания энтропии. В практических же вопросах второе начало термодинамики является законом, позволяющим нам усовершенст-

вовать наши машины и применять его во многих других научных и технических исследованиях. Будем помнить, однако, что, выведенный из наблюдений над процессами доступного нам макромира, он и имеет силу именно в этом макромире. Что же касается внутренней сущности закона, то мы для ее вскрытия должны обратиться к скрытому от обычного наблюдения микромиру, миру атомов и молекул, со своеобразными закономерностями которого имеет дело статистическая физика.

**Статистическое толкование второго закона термодинамики.** Обсуждая законы термодинамики, мы рассматривали лишь внешнюю сторону явлений и пользовались терминологией, не вытекающей из их внутренней сущности. Так, мы говорили о получении и расходовании тепла, о превращении теплоты в работу, о передаче и излучении теплоты. Эта терминология, к сожалению, не только не отражает сущности физических явлений, но и рождает устарелые, отвергнутые теплородные представления. Но мы ничего не могли изменить, так как термодинамика не касается внутреннего содержания явления, не исходит из молекулярно-кинетической картины микромира. Сейчас мы взглянем на вопрос с другой точки зрения.

Скопления огромного числа хаотически мечущихся молекул представляют собой объекты нашего микромира. Массовость и беспорядок определяют законы микромира. Отсюда случайность и законы статистики. События, невозможные по второму закону термодинамики, с точки зрения статистической физики не невозможны, а только маловероятны. Переход тепла от холодного тела к горячему не наблюдается в макромире, но это вовсе не значит, что он невозможен, он только маловероятен. Или более обще: в макромире мы не наблюдаем самопроизвольной концентрации энергии, а между тем в мире с малым числом частиц такое явление возможно. Так, в сосуде, разделенном на две половины, две частицы могут случайно оказаться или вместе в одной половине, или порознь в каждой из двух. Переход обеих частиц в один отсек есть концентрация вещества, а следовательно, и энергии. Однако, чем больше брать частиц, тем меньше вероятность односторонней группировки (концентрации) их при наличии беспорядочного движения. В наших земных условиях, в мире массового скопления молекул (1 *см*$^3$ газа при нормальных условиях содержит $2{,}7 \cdot 10^{19}$ молекул), при соприкосновении двух тел, конечно, более вероятным является переход более быстрых молекул из того тела, где таковых больше, туда, где их меньше, что приведет к выравниванию скоростей, а следовательно, и температур. Тепловой процесс идет здесь от высшего уровня к низшему, потому что такой переход более вероятен. Более вероятен, но не является безусловно необходимым.

В мировом пространстве, где материя разбросана редко, вероятность концентрации энергии повышается, как повышается вероятность падения монеты гербом обязательно вверх при

малом числе бросаний. Событие, невероятное уже при 1000 бросаний, вполне возможно при двух или трех бросаниях.

Понятие энтропии, абстрактное в термодинамической трактовке, приобретает наглядную ясность в статистическом толковании. Статистическое толкование дал Больцман. Энтропия, согласно Больцману, есть функция вероятности. Но какая функция? Выражаясь научным языком, энтропия обладает свойством аддитивности; это значит, что при объединении двух систем общая энтропия равна сумме энтропий составных частей, т. е. в состоянии установившегося равновесия (при постоянной температуре) $S = S_1 + S_2$.

С другой стороны, вероятности независимых событий, как мы знаем (стр. 141), перемножаются.

Следовательно, $W = W_1 W_2$.

Из математики известно, что единственной функцией, которая подчиняется закону

$$f(W_1 W_2) = f(W_1) + f(W_2),$$

является логарифмическая функция, так как

$$\ln(W_1 W_2) = \ln W_1 + \ln W_2.$$

Отсюда и получается знаменитая формула Больцмана:

$$S = k \ln W,$$

где $k$ — постоянная Больцмана, равная $1{,}38 \cdot 10^{-16}$ *эрг/град*.

Следующий пример покажет, какие выводы можно сделать о сравнительной вероятности двух событий. Пусть два тела, одно при температуре 300° К, другое — 301° К, приведены в соприкосновение, при этом количество теплоты в 1 *эрг* переходит от более нагретого тела к менее нагретому, т. е. в направлении, обычно наблюдаемом. Тогда прирост энтропии всей системы будет найден по формуле:

$$\Delta S = \frac{\Delta Q}{T_1} - \frac{\Delta Q}{T_2};$$

$$\Delta S = \frac{1}{300}\ \text{эрг/град} - \frac{1}{301}\ \text{эрг/град} = \frac{1}{9} \cdot 10^{-4}\ \text{эрг/град}.$$

Или из уравнения Больцмана:

$$k \ln \frac{W_2}{W_1} = \frac{1}{9} \cdot 10^{-4}$$

($W_2$ — вероятность нового состояния в ожидаемом смысле, $W_1$ — вероятность начального состояния, ln — знак натурального логарифма).

Подсчет, который мы опускаем, дает:

$$\frac{W_2}{W_1} \approx 10^{10^{10}}.$$

Число $10^{10\,000\,000\,000}$ огромно. Оно изображается единицей с десятью биллионами нулей. Если бы вы попробовали написать его, помещая три нуля на 1 *см* бумаги, то вам понадобилась бы бумажная лента в 100 *км* длиной. Понятно, что вероятность ожидаемого перехода энергии от тела с температурой 28° С к более холодному телу ($t = 27°$ С) становится практически достоверностью.

Статистический подход, как мы знаем, оправдывает себя только для совокупности множества случайных событий. Закон возрастания энтропии в статистическом толковании утверждает только, что такое возрастание надо понимать лишь как наиболее вероятное направление процесса. В макромире это направление предстает перед нами как практически достоверное, но в микромире закон возрастания энтропии оказывается неприменимым. В очень малых объемах и на очень короткое время могут концентрироваться молекулы и с очень большими скоростями (высокая температура) и с очень малыми (низкая температура). То же можно сказать и о распределении давлений, плотностей. Такие местные концентрации (отклонения от статистически равномерного распределения) называются флюктуациями и в некоторых случаях могут быть наблюдаемыми. Наблюдаемое под микроскопом броуновское движение представляет один из примеров подобных флюктуаций. Голубой цвет неба объясняется флюктуациями плотности атмосферного воздуха. Прежде это явление объясняли рассеянием света от мельчайших пылинок, однако удалось доказать, что и совершенно освобожденный от посторонних частиц воздух, помещенный в длинную трубу, имеет голубую тональность.

Больцман, а затем Смолуховский выдвигали в свое время теорию флюктуаций, которую излагать мы не будем, так как она вызвала серьезную критику. Бесспорным, однако, надо признать, что применимость закона возрастания энтропии ограничена рамками изолированных областей макромира. В микромире с его квантовыми законами вопрос теряет определенность и простоту.

Открытия астрофизики последних лет говорят о продолжающемся рождении новых звезд и звездных систем, т. е. о гигантской концентрации материи и энергии. Но ведь планеты, солнца, галактики — это лишь острова в океане Вселенной. Применяя к этим массовым скоплениям хаотически движущихся молекул и атомов закон возрастания энтропии как наиболее вероятного течения процесса в изолированной системе, мы не можем распространять статистические закономерности на преобладающую в мире межзвездную, разреженную среду.

Известно, что сейчас нельзя и вакуум рассматривать как пространство, лишенное всякой материи. В современном понимании и вакуум мы мыслим населенным отдельными частицами вещества и пронизываемым силовыми полями.

Приведу выдержку из одного современного учебника — «Лекции по курсу общей химии» С. А. Щукарева: «Все же до сих пор многое в наших воззрениях на вакуум и мировое пространство остается неясным и связанным с не проверенными еще гипотезами. Луи де Бройль предвидит, например, возможность использования вакуума для получения энергии еще более концентрированной, чем ядерная; вычисляют даже, что энергии вакуума, взятого в объеме одного литра, могло бы хватить на покрытие нужд всей земной промышленности и транспорта в течение миллиона лет. Некоторые ученые предполагают, что вакуум является той праматерией, которая способна в неизвестных нам пока условиях порождать атомы водорода и более простые элементарные частицы, давая таким образом начало воспринимаемому нашими органами чувств состоянию материи».

Отдельные миры, лишенные жизни, такие, как, например, Луна или далекие угасшие звезды, — это лишь местные и, конечно, преходящие тени. Вселенная в целом в свете современной науки является нам не в виде идущего к закату вечера, а как яркий день с его вечной игрой сменяющихся света и теней.

## НА ПОРОГЕ МИКРОМИРА

### (ЧТО НАДО ЗНАТЬ О КВАНТАХ)

Когда говорят о новейшей физике, то имеют в виду главным образом теорию относительности, кванты и физику элементарных частиц. По теории относительности и об элементарных частицах имеется обширная литература. Вопросы же квантовой физики труднее поддаются популяризации. Трудность элементарного изложения понятий квантовой теории обусловливается не только отсутствием у читателя соответствующей математической подготовки, но и сложностью философских понятий, связанных с этой теорией.

В данной беседе мы затронем лишь основные вопросы квантовой механики, без понимания которых теперь затруднительно читать даже популярные книги по физике. Каждый день вы читаете в газетах, слышите по радио об изумительных достижениях современной техники в области ядерной энергетики, электроники. Без квантовой механики не были бы возможны ни исследования атомного ядра, ни транзисторы, ни лазеры.

Классическая физика была создана трудами Галилея, Ньютона, Ампера, Максвелла и других ученых на протяжении трех столетий, предшествовавших XX веку. Грандиозные инженерные и технические сооружения опираются на законы классической механики и классической электродинамики. По законам Ньютона можно было рассчитывать движение планет. Но классическая физика охватывает явления и объекты макромира. Явления же микромира, мира сверхмалых объектов, законам

классической физики не подчиняются. Здесь выступают на сцену своеобразные, особые, квантовые законы. О них и пойдет речь в нашей беседе.

С именами каких ученых связана разработка квантовой теории и каковы основные этапы ее развития?

Понятие о квантах в применении к распределению энергии в солнечном спектре было введено впервые немецким физиком Планком в 1900 г. Слово «квант» — латинское и в переводе на русский язык quantum означает «сколько», т. е. «количество», «порция». Открытие Планка связано с драматическим моментом в истории физики, который сами физики назвали «ультрафиолетовой катастрофой». Что же это за катастрофа и какой выход из нее нашел Планк? Вопрос касался распределения энергии в солнечном спектре, или, говоря вообще, излучения абсолютно черного тела (см. «Беседы по физике», II часть, очерк «Абсолютно черное Солнце»).

Энергия излучения абсолютно черного тела, как следовало из формул классической физики, должна возрастать по мере увеличения частоты, или, что то же, по мере уменьшения длины волны, а между тем экспериментальное исследование при помощи чувствительного термоэлемента, помещаемого в различные места солнечного спектра, обнаружило, что возрастание идет лишь до определенного предела, а потом начинается спад и вся кривая

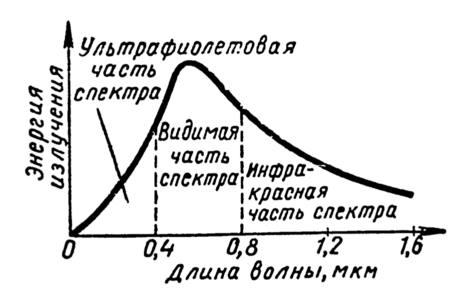


Рис. 137. Распределение энергии в спектре Солнца.

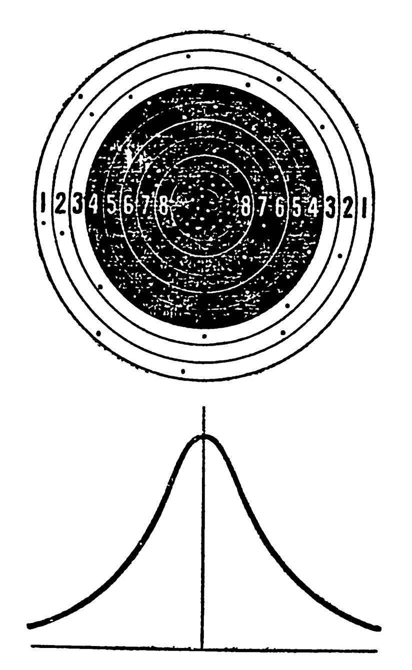


Рис. 138. Распределение попаданий пуль.

распределения энергии имеет колоколообразную форму (рис. 137).

Планк, пользуясь методами статистики и предположив, что испускание энергии происходит не непрерывно, а отдельными порциями (квантами), получил формулу, применение которой давало полное совпадение с кривыми излучения, полученными на основании экспериментов. Формула Планка очень сложна, и я ее не привожу, но чтобы до некоторой степени пояснить сущность дела, напомню кривые распределения статистических величин. Пусть рисунок 138 изображает мишень, пробитую пулями, выпускаемыми одним и тем же стрелком. Если это не никудышный стрелок, то к центру пули ложатся гуще, к периферии — реже. Построим график распределения попаданий, откладывая по вертикали число попаданий между вертикальными полосами, а по горизонтали — расстояния этих полос по обе стороны от центра. Получилась, как видно из чертежа, колоколообразная кривая.

Согласно Планку, излучение представляет тоже поток раздробленных порций энергии (квантов), которые распределяются по такому же статистическому закону, как и поток пуль стрелка.

Энергия отдельного кванта зависит от его частоты $\nu$ и выражается простой формулой:

$$\varepsilon = h\nu,$$

где $h$ — постоянная величина, называемая теперь постоянной Планка. Это очень маленькая величина:

$$h = 0{,}000\,000\,000\,000\,000\,000\,000\,000\,00662 \text{ эрг} \cdot \text{сек.}$$

Я умышленно написал ее со всеми нулями, чтобы более ощутима была ее малость, общепринятое же ее написание $h = 6{,}62 \cdot 10^{-27}$ *эрг·сек.*

Произведение энергии на время — это мера величины, называемой в механике действием. Поэтому $h$ получило название кванта действия. Эта величина весьма часто встречается в формулах, выражающих законы микромира.

В 1905 г. Эйнштейн высказал мысль, что не только излучение и поглощение света, но и распространение света в пространстве происходит порциями (квантами), и предложил эти порции называть фотонами. Каждый фотон несет определенную порцию энергии, соответствующую частоте, а следовательно, длине волны и цветности света.

Возникшее при изучении оптических явлений понятие о квантах скоро перешло и в другие области физики.

В 1913 г. датский физик Нильс Бор применил квантовую теорию для выяснения строения атома, связав свою теорию с известными уже из опыта закономерностями в расположении спектральных линий. При этом пришлось в корне преобразовать сложившуюся к этому времени планетарную модель атома, созданную Резерфордом.

Согласно Резерфорду всякий атом представляет собой миниатюрное подобие планетной системы с ядром в центре и обращающимися вокруг него электронами. Главный недостаток этой теории был в том, что такая планетная система не могла существовать. Обращающийся по орбите вокруг ядра электрон должен излучать энергию в виде электромагнитных волн, а вследствие этого его скорость будет уменьшаться и он через ничтожные доли секунды должен упасть на ядро.

А как же, быть может, спросите вы, объяснить устойчивость больших планетных систем, скажем, нашей солнечной? Не должны ли и Земля, и другие планеты упасть на Солнце?

Электрон в системе Резерфорда излучает потому, что он несет электрический заряд и таким образом создается переменное электрическое поле. А переменное электрическое поле создает переменное же магнитное поле, последнее в свою очередь создает переменное электрическое поле и т. д. Такое последовательное чередование полей и представляет собой распространение электромагнитных волн. Планеты же таких волн не излучают, силы тяготения к Солнцу поэтому прочно удерживают планеты на их орбитах. Для того чтобы спасти планетарную теорию строения атома, Бор ввел понятие о «дозволенных орбитах» — единственно возможных для электронов орбитах в системе атома. Находясь на такой орбите, электрон не излучает.

Вам может показаться, что нет особой разницы между двумя теориями. Почему же, обращаясь по дозволенной орбите, электрон не излучает? Разве не переменное электрическое поле сопровождает движущийся по орбите электрический заряд?

Да, в этом непоследовательность и противоречивость первоначальной теории Бора. Бор не доказывает выдвинутые им положения, они представляют собой постулаты, т. е. исходные условия, требующиеся (от латинского postulatum — требуемое) для построения какой-либо научной теории. Только при соблюдении этих условий будет справедлива выдвигаемая теория. Лишь дальнейшее развитие квантовой теории позволило объяснить физическую причину, стоящую за постулатами Бора. Об этом я скажу несколько позже.

Дозволенных орбит для электрона даже в простейшем атоме водорода много. Если сообщить электрону извне дополнительную, строго определенную порцию энергии, то он может «перескочить» на другую, более удаленную от ядра орбиту, на которой ему тоже разрешено находиться, но лишь очень непродолжительное время. Через миллиардные доли секунды электрон должен возвратиться на свою основную (ближайшую к ядру) орбиту, на которой он может находиться неопределенно долгое время. Такое спокойное состояние атома, когда его электроны находятся на своих основных орбитах, называется основным или нормальным состоянием. Перескок электрона с основной на высшие орбиты приводит атом, образно выражаясь, в «воз-

буждённое состояние». Возбуждение длится какие-нибудь $10^{-8}$ *сек*, и по возвращении электрона на основную орбиту атом снова успокаивается.

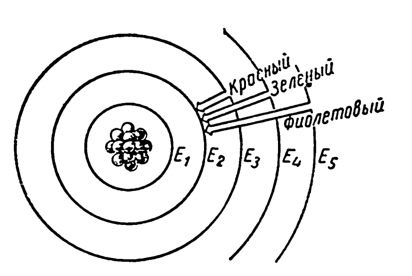



Рис. 139. Орбиты электронов.

Сейчас, однако, принято говорить не об орбитах, а об уровнях энергии. Уровень, соответствующий минимальной энергии, является нормальным, или основным, все остальные соответствуют возбужденному состоянию атома. На рисунках 139 и 140 изображены схемы расположения уровней в атоме водорода и соответствующих им орбит электронов, упрощенно принятых за окружности. Низший уровень является основным. Для атома водорода он соответствует энергии —13,6 *эв* (электронвольт, *эв*, мера энергии, принятая в атомной физике, 1 *эв* = =1,6·$10^{-19}$ *дж*). Минус 13,6 электронвольт! Отрицательная энергия! Как это понять? Но ведь вы знаете, что энергия отсчитывается от некоторого условного уровня, принятого за нулевой. Например, гиря в 1 *кг*, поднятая на высоту 1 *м* над полом в четвертом этаже дома, обладает потенциальной энергией в ≈ 10 *дж* относительно пола данной комнаты, но та же гиря, поставленная на полу третьего этажа, будет обладать отрицательной энергией, если за нулевой уровень принимать тот же уровень пола четвертого этажа. При расстоянии между этажами в 3 *м* гиря на полу третьего этажа обладает энергией — 30 *дж* относительно пола четвертого, так как надо еще совершить работу в — 30 *дж*, чтобы поднять ее на высший уровень. Гиря на полу второго этажа будет обладать энергией —60 *дж*, на полу первого —90 *дж* (все это относительно пола четвертого этажа, приня-

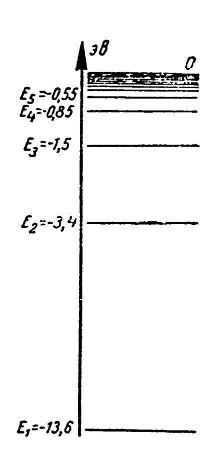



Рис. 140. Уровни энергии электронов.

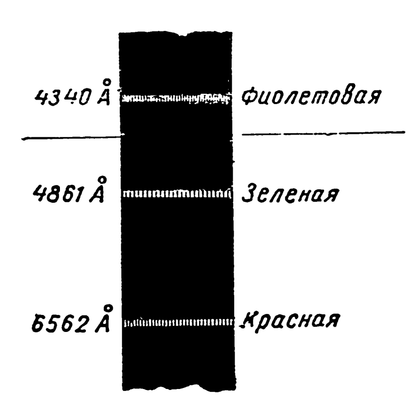



Рис. 141. Спектральные линии водорода.

того за нулевой уровень). Таким образом, результат зависит от исходного начального уровня, условно принимаемого за нулевой.

Какой же уровень надо принять за нулевой для электронов в системе атома? За нулевой энергетический уровень принимают уровень энергии электрона, совершенно удаленного из атомной системы и, следовательно, не обладающего потенциальной энергией относительно ядра атома, и притом неподвижного, например находящегося в виде заряда на изолированном теле. В этом случае кинетическая энергия электрона равна нулю. Попади такой электрон в электрическое поле, он придет в движение, но будет обладать уже положительной энергией, которая может возрастать непрерывно. Внутри же атомной системы уровни энергии электрона отрицательны и дискретны, т. е. отличаются друг от друга на определенные порции энергии. Энергетические уровни в атоме водорода в порядке удаления от ядра (начиная со второго) следующие: $E_2 = -3{,}4$ *эв*, $E_3 = -1{,}5$ *эв*, $E_4 = -0{,}85$ *эв* и т. д.; по мере приближения к нулевому уровню они располагаются все теснее и теснее.

Развитие теории Бора тесно связано с исследованием спектральных линий. Взгляните в спектроскоп на розоватое свечение в вакуумной трубке с разреженным водородом. (Чтобы вызвать такое свечение водорода, к электродам трубки нужно подвести высокое напряжение от индукционной катушки или от электрофорной машины.) В поле зрения спектроскопа на темном фоне ярко светятся три спектральные линии водорода (рис. 141): красная, сине-зеленая и фиолетовая. Есть еще четвертая, тоже фиолетовая, но она расположена близко к концу спектра, и ее не во все спектроскопы удается различить. Длины волн и частоты, соответствующие этим линиям, следующие:

| λ, Å | ν, 1/*сек* |
|---|---|
| Красная . 6562 | $0{,}457 \cdot 10^{15}$ |
| Зеленая . 4861 | $0{,}617 \cdot 10^{15}$ |
| Фиолетовая 4340 | $0{,}691 \cdot 10^{15}$ |

Еще задолго до появления теории Бора о строении атома швейцарский учитель Бальмер в 1885 г., изучая соотношения частот, соответствующих линиям водородного спектра, нашел путем пробных подстановок чисел, что эти частоты могут быть вычислены по следующей формуле: $\nu = R\left(\frac{1}{m^2} - \frac{1}{n^2}\right)$, где $R$ — некая постоянная величина (постоянная Бальмера — Ридберга), а $m$ и $n$ — целые числа натурального ряда, причем

$n > m$. Для видимой части водородного спектра $R = 3{,}288 \times \times 10^{15}$ 1/*сек*, $m = 2$, $n = 3$, 4, 5, 6 и т. д.

Если же принять $m = 1$, то последовательные значения $n = 2$, 3, 4, 5 и т. д., но эти линии уже будут в невидимой части спектра (ультрафиолет); при $m = 3$, $n = 4$, 5, 6 и т. д., а линии, соответствующие частотам, вычисленным при подстановке этих чисел, будут тоже за пределами видимости, в инфракрасной части спектра.

Формула Бальмера, составленная простым подбором чисел («цифрология»), конечно, не давала объяснения происхождения спектральных линий, она только устанавливала закономерность в их распределении.

Бор первым делает попытку связать появление тех или иных спектральных линий со строением и жизнью атома. Согласно его теории, электрон, переходя с высшего уровня возбужденного атома на низший и в конечном счете на основной, должен выделять энергию, избыточную по сравнению с той, которая соответствует основному уровню. Выделение энергии происходит в виде излучения электромагнитной волны, частоту которой можно подсчитать из формулы:

$$\varepsilon = E_n - F_1 = h\nu.$$

По этой же формуле можно подсчитать и энергию, необходимую для возбуждения атома при перескоке электрона на тот или другой высший энергетический уровень.

Для предельного случая ионизации, т. е. для полного удаления электрона из системы атома или для перевода электрона с основного уровня на условный, бесконечно удаленный, мы в формуле Бальмера должны принять $m = 1$, а $n = \infty$ (очевидно, числа $m$ и $n$ определяют номера орбит).

Тогда частота, соответствующая бесконечно удаленной орбите, будет:

$$\nu = R\left(1 - \frac{1}{\infty}\right) = 3{,}288 \cdot 10^{15} \text{ 1/сек},$$

а энергия, необходимая для освобождения электрона,

$$E_1 - E_0 = h\nu = 13{,}6 \text{ эв}.$$

Следовательно, $E_1 = -13{,}6$ *эв*, $E_0 = 0$.

Подставляя в формулу Бальмера $m = 1$, $n = 2$, получим частоту $\nu = 2{,}466 \cdot 10^{15}$ 1/*сек*, откуда $E_2 - E_1 = 10{,}2$ *эв* и $E_2 = -3{,}4$ *эв*.

Подстановка $m = 2$, $n = 3, 4, 5 \ldots$ позволит таким же способом определить $E_3 = -1{,}51$ *эв*; $E_4 = -0{,}85$ *эв*; $E_5 = -0{,}55$ *эв*.

Частоты, соответствующие переходам $E_3 - E_2$, $E_4 - E_2$, $E_5 - E_2$, совпадают со значениями частот спектральных линий водорода (стр. 190).

Согласно теории Бора, при возвращении электрона в возбужденном атоме с высших орбит (уровней) на основную и происходит излучение спектральной линии соответствующей цветности.

Что же заставляет электрон перейти с основного состояния на один из высших энергетических уровней? Сообщение энергии извне. Например, посторонний электрон (катодные лучи), проникая в систему атома и сталкиваясь с электроном на основной орбите, может, если сам обладает достаточной энергией, передать ему порцию энергии, необходимой для перехода на тот или другой высший уровень. Источником энергии возбуждения может быть влетевший фотон или, наконец, поле высокого напряжения.

Чтобы лучше уяснить все сказанное, попробуем разобрать следующую задачу: «Какие возбужденные состояния могут возникнуть в атоме водорода при столкновении с электроном (внешним), имеющим энергию 12,6 *эв*?»

Прежде всего мы можем сделать заключение, что запаса энергии электрона-пришельца не хватит для ионизации атома. Возможны лишь изменения внутри энергетических уровней. Какие же?

1) С основного уровня $E_1$ электрон может быть поднят на уровень $E_2$. На это надо затратить такую энергию: 13,6—3,4 = = 10,2 (*эв*).

2) С основного уровня электрон может быть поднят и на уровень $E_3$, так как 13,6 — 1,5 = 12,1 (*эв*), а запас энергии у влетевшего электрона 12,6 *эв*.

На уровень же $E_4$ электрон подняться не сможет, так как энергии влетевшего электрона не хватит: на осуществление этого перехода необходима энергия 13,6 — 0,85 = 12,75 (*эв*).

А что же произойдет с влетевшим электроном? Он пролетит через систему, унося с собой в первом случае энергию 12,6— —10,2 = 2,4 (*эв*), во втором — 12,6 — 12,1 = 0,5 (*эв*).

Каковы же частоты и соответствующие им длины волн, излучаемых атомом при возвращении из возбужденного в нормальное состояние? Это можно подсчитать по формулам:

$$E_2 - E_1 = h\nu_1;\ E_3 - E_2 = h\nu_2$$

$$\text{и } \lambda = \frac{c}{\nu} \ (c \text{ — скорость света}).$$

Предоставляем это сделать самим читателям.

Теория Бора, однако, может показаться искусственной, словно специально подогнанной для того, чтобы объяснить цифрологию Бальмера. Существуют ли какие-либо экспериментальные доказательства, подтверждающие дискретность передачи энергии?

Есть, и даже несколько... Я приведу только два: опыт немецких физиков Франка и Герца и опыт советского ученого С. И. Вавилова.

**Опыт Франка и Герца.** Чтобы лучше понять идею и результаты этого опыта, вспомним известную лабораторную работу из школьного курса физики — снятие сеточной характеристики трехэлектродной радиолампы (рис. 142). Создавая то или иное напряжение *U* между сеткой и нитью накала лампы, можно изменять величину анодного тока. График на этом рисунке показывает изменение анодного тока в зависимости от потенциала сетки.

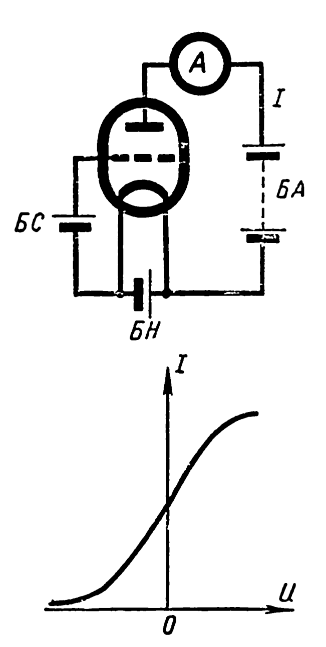



Рис. 142. Снятие сеточной характеристики триода.

Упрощенная схема опытов Франка и Герца (рис. 143) показывает аналогичное расположение приборов. Разница лишь в том, что в трубке не вакуум, а пары ртути. Поток электронов, испускаемый накаленным катодом *K*, устремляется к аноду. По пути электроны сталкиваются с атомами ртути, но, обладая в тысячи раз меньшей массой, не изменяют величины скорости, подобно тому как стальной шарик малой массы при встрече с шаром большой массы испытывает упругий удар и отскакивает с той же скоростью и той же кинетической энергией.

Вследствие приобретенной в электрическом поле большой скорости электроны проскакивают через сетку и попадают на анод, при этом гальванометр показывает наличие тока в анодной цепи. При увеличении напряжения между катодом и сеткой (реостаты на схеме не показаны) будет возрастать и анодный ток.

Между сеткой и анодом включено тормозящее напряжение *БС* небольшой величины, всего 0,5 *в*. При большой скорости электронов оно не может сколько-нибудь заметно затормозить их полет, и поэтому график в начале опыта напоминает график анодной

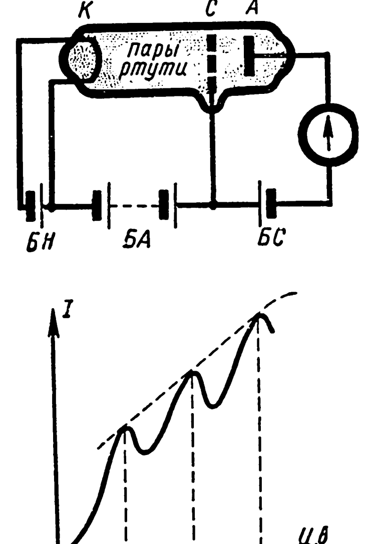



Рис. 143. Схема опыта Франка и Герца.

характеристики радиолампы. При дальнейшем увеличении напряжения вдруг происходит резкий скачок тока вниз (см. график рис. 143). Это соответствует энергии электронов 4,9 *эв*, т. е. энергии, приобретаемой электроном при разности потенциалов на его пути в 4,9 *в*. Почему могло произойти столь резкое падение силы тока? Это могло произойти только потому, что энергия электрона достигла порогового уровня, необходимого для возбуждения атома ртути. Удар получается уже не упругий, и электрон, отдавший на возбуждение атома ртути бóльшую часть своей энергии, продолжает свой путь с остатком энергии, недостаточным для преодоления тормозящего напряжения *БС*. Продолжая увеличивать напряжение между катодом и сеткой, мы увидим, что ток снова возрастает, но, когда напряжение повысится еще на 4,9 *в* и станет равным 9,8 *в*, снова произойдет резкое уменьшение тока. Значит, опять произошел неупругий удар, и снова возбужден атом ртути, и так будет продолжаться через каждые 4,9 *в*. Посмотрите на график — вот как изменилась характеристика ртутной лампы по сравнению с вакуумной (пунктир).

Возбужденное состояние ртутного атома длится недолго: через $10^{-8}$ *сек* он возвращается в нормальное состояние, излучая при этом электромагнитные волны длиной 2537 Å (в пределах ультрафиолета). Подсчитав энергию излученного кванта, получим как раз ту величину, которая соответствует энергии электрона, потерянной при неупругом ударе. Опыт, таким образом, блестяще подтверждает квантовую теорию.

**Опыт Вавилова.** Если опыт Франка и Герца подтверждает теорию квантов все же косвенно, то опыт С. И. Вавилова надо рассматривать как прямое, непосредственное доказательство дискретной природы света. Думается, что лучше всего предоставить слово самому экспериментатору, поэтому я привожу выдержку из замечательной книги С. И. Вавилова «Глаз и Солнце»:

«Свет может поглощаться и действовать только целыми квантами... Предельная величина порога зрительного раздражения выражается для света с длиной волны около 500 *ммк* цифрой около $5 \cdot 10^{-18}$ калорий в секунду на *см*$^2$, что соответствует 52 квантам. Эти 52 кванта растянуты на секунду. Отсюда ясно, что мгновенно глаз в состоянии зрительно почувствовать очень небольшое число квантов...

Пользуясь этим, можно глазом обнаружить квантовое строение света. Представим себе, что мы смотрим на маленькое, слабо светящееся пятнышко *А* (рис. 144), яркость которого можно по произволу ослаблять. Предположим, что яркость источника ослаблена до такой степени, что от него в глаз попадает в секунду только небольшое число квантов. Кванты не могут следовать один за другим регулярно, через одинаковые промежутки времени: они будут лететь беспорядочно, иногда в большем числе, иногда в меньшем. Разумеется, и яркий источник света

излучает беспорядочный поток квантов, но в этом случае число квантов огромно и процентные случайные отклонения от среднего будут практически незаметны. Точно так же, например, проценты колебания в числе новорожденных за год в большом городе ничтожны, и это число статистика предсказывает с большой точностью, но число рождений в небольшом доме того же города за год будет колебаться в чрезвычайно широких пределах, и предсказания статистики в этом случае, несомненно, окажутся ошибочными.

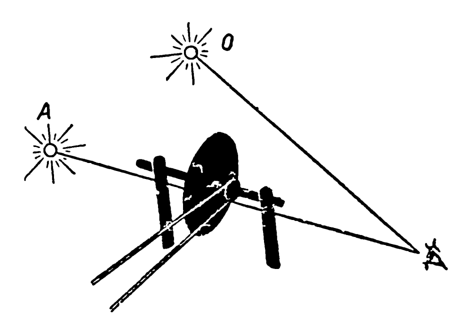


Рис. 144. Схема опыта Вавилова.

Таким образом, по законам статистики (если только верна теория квантов) следует ожидать, что при ослаблении источника света, когда за секунду в глаз будет попадать небольшое число квантов, должны возникнуть резкие колебания яркости. Если число квантов, попадающих в глаз, будет меньше числа, соответствующего порогу зрительного раздражения, то глаз не ощутит света; если число квантов превысит порожное значение, свет будет виден. Следовательно, при постепенном понижении яркости источника должен наступить такой момент, когда источник для глаза должен превратиться из постоянного в мигающий.

Однако в такой простой форме опыт осуществить нельзя по двум причинам. Во-первых, глазное яблоко чрезвычайно подвижно, вследствие чего колебания яркости получаются и при больших интенсивностях. Поэтому глаз следует фиксировать. Это достигается тем, что в стороне от светящейся точки *A* помещают более яркую (обыкновенно красную) светящуюся точку *O*, которая и фиксируется глазом. Таким образом, в центре сетчатки получается изображение этой фиксационной точки, а изображение источника *A* получается в стороне, на некотором расстоянии от центра.

Далее, глаз обладает свойством сохранять зрительное впечатление; это свойство дало, например, возможность осуществить кино. Но оно же, конечно, будет мешать восприятию быстрых колебаний интенсивности источника света: эти колебания будут сливаться, размываться и усредняться для глаза.

Чтобы обойти это затруднение, можно поступить так. Между глазом и источником помещается диск с одним отверстием. Диск совершает один оборот в секунду, оставляя источник открытым для глаза только во время прохождения отверстия (например, в течение $^1/_{10}$ *сек*). При такой установке глаз видит только короткие вспышки через каждую секунду. Если число квантов во время такой вспышки будет одно и то же и больше

порожного значения, то каждому прохождению отверстия будет соответствовать вспышка. Если же число квантов, излучаемых за время прохождения отверстия, подвергается резким статистическим колебаниям, то, очевидно, не всякому прохождению отверстия будет соответствовать видимая вспышка.

Опыт подтвердил это ожидание. Действительно, при большой интенсивности фиксированный глаз при каждом прохождении отверстия видит вспышку. Но при постепенном ослаблении яркости начинают наблюдаться пропуски, которые становятся тем чаще, чем слабее яркость.

Считая число пропусков и вспышек, по законам статистики можно определить среднее число квантов, излучаемых при таких условиях за одну вспышку. Глаз, таким образом, действительно «воочию» позволяет убедиться в квантовой, прерывной структуре света».

Я привел эту пространную выдержку из книги С. И. Вавилова не только потому, что ученый, непосредственно проводивший эксперимент, лучше, чем кто-либо другой, сумеет рассказать о нем, но и потому, что на этом детальном описании превосходно показан метод физического исследования, анализ всех условий для успешного его проведения.

Эти два доказательства дискретности света и передачи энергии рассеивают все сомнения. Но не представляет ли собой квантовая теория света возврата к старой «теории истечения» Ньютона, согласно которой свет считался потоком светоносных частиц, корпускул? Есть ли разница между корпускулой и квантом света?

Корпускулы Ньютона были в его представлении частицами вещества. «Не являются ли световые лучи очень небольшими телами, посылаемыми светящимся веществом?» — спрашивает Ньютон в своей «Оптике».

Современные же фотоны, или кванты света, — это частицы поля. Общее у фотонов и корпускул то, что и вещество, и поле материальны. Вещество и свет — это два вида материи. Поле, элементарными частицами которого являются фотоны, есть поле электромагнитное. Корпускулы Ньютона могли двигаться с различными скоростями, могли находиться в покое, могли содержаться в источнике света. Фотоны могут быть только в движении, и притом с одной, максимальной из всех возможных, скоростью — скоростью света в вакууме: ни ускорить, ни замедлить, ни остановить фотоны нельзя. Разве можно остановить свет?! При остановке фотон исчезает. Масса покоя фотона равна нулю.

А можно ли сказать, что фотон — это частица энергии?

Ни в коем случае! Энергия неотделима от материи и является ее свойством, характеристикой движения материи. Фотон не является частицей энергии, фотон обладает энергией. В этом понимании различия между частицей поля и частицей вещества нет — любая материальная частица обладает энергией, импульсом, массой.

Все же, что же такое свет? Частицы или волны? То мы говорим об отдельных фотонах (опыты, о которых мы сейчас рассказали, убедительно подтверждают прерывность строения света), то мы говорим о волнах света, т. е. об электромагнитных волнах определенной длины. О волновой природе явления свидетельствуют интерференция и дифракция света. В учебнике физики сказано, что свет обладает как волновыми, так и корпускулярными свойствами. Но как же примирить эту двойственность, как понять, что же такое свет?

Да, вопрос о двойственной природе света, или вопрос о корпускулярно-волновом дуализме (от латинского «дуо» — два), долго волновал выдающиеся умы. Действительно, в одних случаях свет, бесспорно, проявляет свою волновую природу, в других — корпускулярную. «Неужели мы должны считать свет состоящим из корпускул в понедельник, вторник и среду, пока мы проделываем опыт с фотоэффектом... и представлять себе его волнами в четверг, пятницу и субботу, когда мы работаем с явлениями дифракции и интерференции?» — восклицает английский физик Брэгг.

Попытки разрешить это мучительное противоречие привели к созданию волновой, а потом квантовой механики (1923 — 1926 гг.).

В 1924 г. молодой французский физик Луи де Бройль защищал в Сорбонне диссертацию на тему «Анализ квантовой теории».

Установленные Эйнштейном законы фотоэффекта в сочетании с положением теории относительности о соотношении массы и энергии выражали одновременно волновые свойства света и свойства света как состоящего из частиц (фотонов, или квантов). Будучи дискретным, свет обладал свойствами материальной частицы с ее энергией, массой и импульсом и в то же время свойствами волны с ее длиной и частотой.

Де Бройль сделал предположение, что соотношения, справедливые для фотона, можно приписать электрону.

Если сопоставить уравнения для энергии фотона $E = h\nu$ и $E = mc^2$, то можно написать соотношение: $mc^2 = h\nu$ и из него найти выражение для импульса (произведение массы на скорость фотона):

$$mc = \frac{h\nu}{c}, \text{ или } mc = \frac{h}{\lambda}, \text{ так как } \nu = \frac{c}{\lambda},$$

тогда для импульса электрона $p$ аналогично получим:

$$p = mv = \frac{h}{\lambda},$$

или

$$\lambda = \frac{h}{p} \text{ (формула де Бройля).}$$

Диссертация, по собственному признанию де Бройля, была встречена сначала с удивлением и недоверием. Научный руководитель диссертанта известный физик Ланжевен, вспоминая через много лет об этом, в беседе с академиком Иоффе сказал: «Идеи диссертанта, конечно, были вздорны, но развиты с таким изяществом и блеском, что я принял диссертацию к защите». Мнение Ланжевена понятно, ведь он был ученым другого поколения, чем де Бройль. Защищал же де Бройль свою диссертацию тогда, когда никто еще не подозревал о таких волновых признаках электрона, как явление дифракции, которое было открыто только через три года.

Известно, что дифракция света объясняется огибанием световыми волнами краев предмета или отверстия. Для того чтобы заметить это явление, необходимо, чтобы размеры препятствия или отверстия были того же порядка, что и длина волны. Только через дифракционную решетку из тесно расположенных штрихов, через сетку ресниц, через ткань носового платка, через насыщенный ледяными кристаллами или капельками тумана воздух можно наблюдать дифракционные полосы или кольца — венцы вокруг Луны.

Когда были открыты рентгеновские лучи, то долгое время их природа оставалась неизвестной — частицы это или волны. Обычные приемы обнаружения дифракции, а значит, волновой природы лучей не годились, так же как не годились бы в качестве дифракционной решетки для видимых лучей забор из штакетника или ряд телеграфных столбов вдоль дороги — слишком велики просветы. Только в 1912 г. немецкому физику Лауэ пришла мысль использовать для обнаружения дифракции столь коротковолновых лучей, как рентгеновские, не обычные дифракционные решетки, а пространственные решетки кристаллов. Пропуская рентгеновские лучи через кристалл, удалось на фотографической пластинке, помещенной позади кристалла, получить картину дифракционных колец (рис. 145), что и доказало общую физическую природу икс-лучей (старинное название рентгеновских лучей) и света.

Так как длина волны электрона примерно та же, что и рентгеновских лучей, то таким же методом удалось получить дифракцию электронов через тонкие металлические пленки. Рисунок 146 показывает дифракционную картину, полученную при прохождении электронов через очень тонкий слой серебра. Таким образом, волновая природа электронов, подтвержденная экспериментально, становится бесспорной.

Де Бройль распространил этот вывод и на любые материальные частицы и тела.

Из формулы де Бройля $\lambda = \frac{h}{mv}$ видно, что, чем больше масса тела, тем меньше длина волны. Так, для электрона, движущегося по основной орбите со скоростью $2 \cdot 10^8$ *см/сек* и имеющего массу $9{,}1 \cdot 10^{-28}$ *г*, длина волны $\lambda = 3{,}5 \cdot 10^{-8}$ *см* $= 3{,}5$ Å.

Для винтовочной пули массой 10 *г*, летящей со скоростью 700 *м/сек*, $\lambda = 1 \cdot 10^{-22}$ *см*. Для Земли, вращающейся вокруг Солнца, $\lambda = 3 \cdot 10^{-61}$ *см*!

Конечно, в последних двух примерах волны настолько малы по сравнению с самим телом, что их обнаружить невозможно, и при изучении макроскопических тел их волновые свойства значения не имеют и не учитываются.

Что же представляют собой волны де Бройля, или, как их называют, волны материи?

Ответ на этот вопрос будет дан несколько позже. Пока же выясним, «с чем не надо смешивать» волны материи. Волны де Бройля не следует смешивать с материальными волнами, такими, как механические, акустические, электромагнитные. Даже сравнения здесь скорее вредят, чем помогают. Все попытки рассматривать «волны материи» как волны в какой-то среде оказались несостоятельными. Смысл волновой механики приходится искать в понятиях теории вероятности.

С дальнейшим развитием квантовой теории связаны два имени: Шредингера и Гейзенберга. Развитие идей де Бройля этими физиками привело, наконец, к уничтожению корпускулярно-волнового дуализма.

Математические трудности изложения волновой механики Шредингера, а тем более квантовой механики Гейзенберга заставляют меня ограничиться лишь общей характеристикой новых идей, внесенных этими физиками в квантовую теорию.

Заслугой Шредингера является то, что он выразил волновую характеристику электрона в ви-

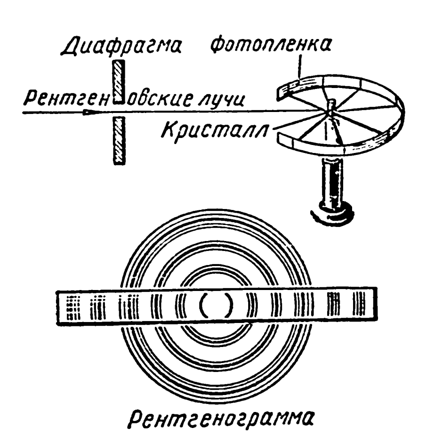



**Рис. 145. Дифракция рентгеновских лучей в кристалле.**

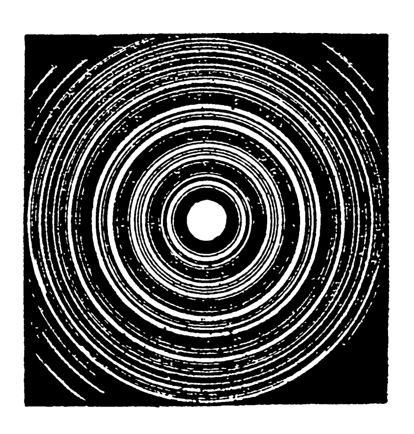


**Рис. 146. Дифракция электронов.**

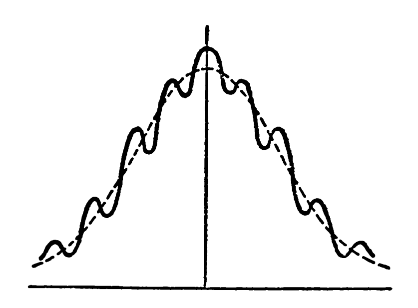


**Рис. 147. Кривая распределения электронов.**

де особой сложной функции, получившей название пси-функции ($\psi$ — греческая буква «пси»).

Пси-функция определяет состояние электрона, фотона или другой частицы.

Формулу уравнения Шредингера, составленного для этой функции, я не привожу, так как ее написание выходит за рамки элементарной математики. Выяснить же физический смысл величин, входящих в это уравнение, нам позволит статистический метод теории вероятностей.

Представим себе стрельбу из пулемета по удаленной мишени. Места попаданий в мишень образуют знакомую нам картину случайного распределения. Графически она, как мы уже знаем, изображается колоколообразной кривой. Если бы мы изобразили графически закон распределения попадания электронов, прошедших через тонкий металлический слой и давших на фотографической пластинке картину дифракции, то получили бы колоколообразную же кривую, но не плавную, а волнистую (рис. 147). Таков же график распределения интенсивности и рентгеновских лучей, в волновой природе которых теперь никто не сомневается. Максимумы кривой распределения в том и другом случае соответствуют темным кольцам дифракционной картины, минимумы — светлым. О чем же это говорит?

Если бы можно было взять для наблюдения дифракции пучок не из многих миллионов электронов, а из очень небольшого числа их или проследить за полетом одного электрона, то место попадания его в пластинку точно определить было бы невозможно. Наиболее вероятно, что он попадет в точку, расположенную где-нибудь на темном кольце. Если повторять опыт много раз, то электроны, попадая последовательно в различные точки кольца, покажут ту же картину, какая получится сразу от множества летящих электронов. Только ждать пришлось бы дольше, пока из отдельных точек получились бы ясно выраженные кольца. Советские ученые Биберман, Сушкин и Фабрикант провели аналогичный опыт с небольшим числом электронов, тем самым подтвердив, что волновые свойства присущи каждому электрону в отдельности.

Интенсивность волновой функции характеризует вероятность нахождения электрона в данной точке пространства. Волны материи оказываются волнами вероятности. В микромире законы вероятности заменяют законы классической механики. В этом и разрешение корпускулярно-волнового дуализма, независимо от того, будут ли это фотоны или элементарные частицы вещества.

Чрезвычайно важное следствие вытекает отсюда для нашего понимания строения атома. От старой планетарной теории приходится теперь совершенно отказаться. Приходится отказаться и от таких, казалось бы, самоочевидных понятий, как траектории. Астрономы с величайшей точностью могут рассчитать и указать, в какой точке неба в таком-то году, в такой-то момент будет находиться какая-нибудь планета. При расчетах и

запуске космических кораблей тоже требуется совершенно точно определить местонахождение корабля на определенной траектории. Ничего подобного нельзя сказать о микромире. Мы можем только вычислить вероятность нахождения электрона в определенном месте в данный момент времени. Понятие траектории теряет в микромире всякий смысл. Вместе с тем теряется и наглядность наших представлений. Конечно, мы можем пользоваться схемами движения электронов по орбитам, но надо отчетливо понимать условность такого представления. Нашему привычному и потому наглядному представлению миниатюрной солнечной системы с центром в виде ядра и кружащимися вокруг него планетами — электронами нет места в квантовой теории.

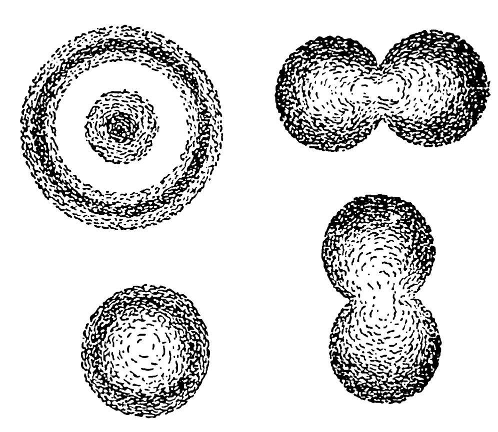


Рис. 148. Некоторые формы водородоподобных атомов.

Но, вспомните, и сама-то идея гелиоцентрической планетной системы разве не без жестокой борьбы получила всеобщее признание? Так и сейчас смущенный ум силится оторваться от веками выработанных и потому удобных представлений и все еще ищет опоры в привычных образах. Дело, конечно, не в привычке, а в развитии науки, в появлении вновь открытых фактов, вновь разработанных учений. Попробуйте сейчас в век космических облетов нашей Земли отказаться от ненаглядных когда-то представлений о шарообразности и движении Земли! Так и квантовая теория вместо примитивной планетарной схемы рисует нам образ атома в виде туманного облака, меняющего свои очертания в различных состояниях возбуждения (рис. 148). В этом туманном клубке расплываются и становятся неопределенными траектории электрона. Мы можем судить лишь о вероятности нахождения электрона в той или другой точке этого туманного облака. Где облако гуще, там больше вероятность нахождения электрона. Только вероятность, не больше! Судить количественно об этой вероятности позволяет нам квадрат амплитуды волновой функции. Здесь уже полный отход от представлений классической механики. Там знание положения материальной точки (знание ее координат) и ее скорости позволяли (при отсутствии посторонних влияний) судить о будущем: о положении, куда переместится наша точка в следующий момент, и т. д. Мы могли вычертить траекторию полета.

Совершенно не так обстоит дело в мире микрочастиц. Здесь царит принцип неопределенности (установлен Гейзенбергом),

который является основным законом микромира. Принцип неопределенности гласит, что нельзя одновременно точно установить положение и скорость микрообъекта. Мы можем точно указать или положение и тогда неопределенной останется скорость, или можно измерить скорость, но тогда нельзя указать координаты.

Не вдаваясь в подробности физического и философского значения принципа неопределенности, поясню лишь, почему наша попытка определить скорость и положение микрообъекта терпит (должна терпеть!) неизбежную неудачу.

Допустим, мы определили скорость частицы, вернее, импульс по измеренной длине волны $\left(mv = \frac{h}{\lambda}\right)$. Теперь мы желаем определить положение частицы. Конечно, глазом ее мы видеть не можем, но мы можем сфотографировать ее. Однако для этого ее надо «осветить», и притом светом, длина волны которого должна быть соизмерима с размером частицы, иначе из-за дифракции ничего не выйдет. Увы, чем короче длина волны, тем больше ее энергия, и, «освещая» частицу, мы сместим ее с ее истинного положения, которое собирались определить.

Что же, значит, дело только в измерении? Нет, приведенный пример только уступка нашему желанию наглядности. И без нашего вмешательства с прибором измерения принцип неопределенности остается законом. Координаты и импульс в микромире взаимосвязанны. В этой взаимной связи кроется и взаимосвязь волновых и корпускулярных свойств материи. «Материя, т. е. вещество и свет, одновременно обладает свойством волн и частиц, но в целом это не волны и не частицы и не смесь того и другого. Наши механические понятия не в состоянии полностью охватить реальность, для этого не хватает наглядных образов», — говорил С. И. Вавилов.

Все же читатель может задать вопрос: почему атом в основном состоянии не излучает?

Я полагаю, что все изложенное дает уже на это ответ. Ведь, чтобы излучать, электрону надо перейти на более низкий уровень, но такового нет. Статистические расчеты по уравнению Шредингера определяют основной уровень как последний из возможных, значит, нет и причины для излучения при переходе с этого уровня. Но нет и причины для излучения электрона, находящегося на нем. Не как заряженный шарик, обращающийся вокруг ядра по орбите и создающий при этом переменное электрическое поле и потому излучающий электромагнитные волны, представляем мы себе электрон согласно квантовой теории, а как некоторое облако с вероятностным распределением положений электрона на нем. При этом независимо от расположения заряда электрона в пространстве определенной волне должно соответствовать неизменное постоянное, а не переменное электрическое поле. Следовательно, электрон, находясь на стационарном уровне, не излучает. Это относится не

только к основному уровню, но и к любому разрешенному уровню. Только на высших уровнях электрон пребывает обычно ничтожные доли секунды. Лишь при очень высоких температурах, какие имеются на Солнце и звездах, атомы могут длительное время находиться в возбужденном состоянии.

Наша беседа об основных понятиях квантовой механики останется незаконченной, если мы не остановимся еще на вопросе о так называемых квантовых числах и принципе Паули.

Квантовые числа характеризуют квантовое состояние, а изучение квантового состояния — это и есть содержание физики микромира, к которому приковано внимание физиков наших дней.

Микромир также полон движения и изменения, как и обычный, всем знакомый макромир. Основное различие только в дискретности, порционности, квантовом характере изменений в микромире. Напомню: когда говорят, что какая-нибудь величина квантуется, — это значит, что ее изменения происходят не непрерывным процессом, а скачками, порциями, квантами. Квантуется энергия элементарных частиц (электрическая и другая), импульс (количество движения), момент количества движения, заряд и др.

Для характеристики квантового состояния служат четыре квантовых числа: $n$, $l$, $m$, $s$. Первые три из них находят свое приложение уже в теории Нильса Бора о строении атомов. Рассмотрим их ближе.

Число $n$ (от слова «номер») — это первое введенное в физику квантовое число. Оно носит название главного квантового числа и обозначает номер орбиты электрона (по Бору), или, лучше сказать, номер (порядок) энергетического, квантового уровня. Ясно, что оно может принимать только целые значения, ведь счет по порядку ведется целыми числами, а главное, ведь энергетические уровни возрастают скачками. В рассмотренной раньше схеме атома водорода это число может принимать значения $n = 1$, $n = 2$ и т. д. по порядку от центра к периферии. В нормальном (невозбужденном) состоянии электрон находится на первой из «дозволенных орбит», условно показанных на рисунке 139 окружностями.

Значение $n$ связано с основными величинами, характеризующими атом, — массой электрона, его скоростью, радиусом орбит — и подчиняется следующему условию:

$$2\pi r m v = nh,$$ где $h$ — постоянная Планка.

Иначе говоря, импульс электрона, помноженный на длину окружности соответствующей орбиты, равен целому кратному постоянной Планка. Отсюда можно рассчитать, каковы могут быть радиусы дозволенных орбит. Так, при $n = 1$, т. е. для орбиты электрона в невозбужденном атоме водорода, $r = 0{,}53 \cdot 10^{-10}$ *м*, или 0,53 Å. Теперь вам известен диаметр

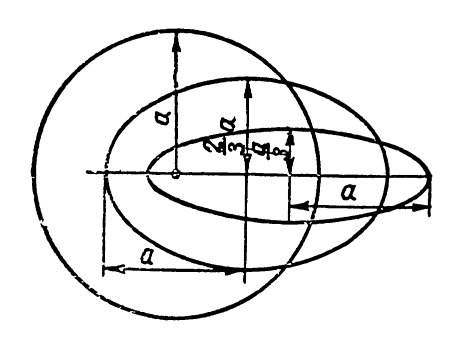


Рис. 149. К понятию орбитального квантового числа.

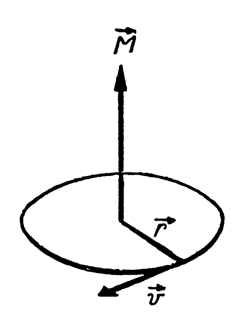


Рис. 150. Момент количества движения.

атома водорода, подсчитайте же для интереса, сколько атомов уложится вплотную на длине в 1 *мм*.

Радиусы «орбит» электрона в возбужденном атоме водорода увеличиваются пропорционально квадратам последовательных значений квантового числа $n$.

В зависимости от $r$, т. е. от степени удаленности электрона от ядра, находится и степень связи его с ядром и величина работы, необходимой для отрыва электрона от атома водорода. Закон Бора, определяющий величину этой работы, выражается формулой:

$$A = \frac{2\pi^2 me^4}{h^2} \cdot \frac{1}{n^2}.$$

Подставляя в эту формулу значения входящих в нее величин (массы, заряда, постоянной Планка и соответствующего квантового числа $n$) и выражая работу в электронвольтах, можно получить приведенные выше значения энергетических уровней.

В эволюции боровской модели атома можно отметить некоторое сходство с развитием модели планетной системы. Подобно тому как Кеплер уточнил картину строения солнечной системы, введя вместо первоначальных круговых орбит Коперника орбиты эллиптические, а Ньютон из анализа этих планетных орбит вывел закон всемирного тяготения и доказал, что пути небесных тел, обращающихся вокруг Солнца, должны представлять собой одно из конических сечений (окружность, эллипс, параболу или гиперболу), так и в первоначальную боровскую схему были внесены уточнения. Электрон только в исключительных случаях обращается вокруг ядра по окружности, обычно же по более или менее вытянутому эллипсу. Соотношение полуосей эллипса $a$ и $b$ выражается формулой:

$$b = a\frac{l+1}{n},$$

где $l$ представляет собой второе, или побочное, квантовое число

Если главное квантовое число $n$ принимает значения 1, 2, 3, ... ..., $n$, то побочное квантовое число $l$ может принимать одно из целых значений ряда 0, 1, 2, ..., $(n - 1)$. В зависимости от величины числа $l$ получаются более или менее растянутые эллипсы. Ряд ограничен последним членом $(n - 1)$. Если мы подставим это значение в формулу полуосей эллипса, то

$$b = a\frac{n - 1 + 1}{n} = a,$$

т. е. эллипс переходит в окружность. Например, при $n = 3$ возможны только три значения $l$, равные 0, 1, 2 (рис. 149). Основному (невозбужденному) состоянию электрона при $n = 1$ соответствует лишь одно-единственное значение $l = (n - 1) = 1 - 1 = 0$ и единственная круговая орбита.

Второе квантовое число называется также орбитальным квантовым числом, так как оно отображает величину вращательного орбитального момента количества движения $mvr$. Орбитальный вращательный момент можно изобразить вектором $\vec{M}$, перпендикулярным к плоскости орбиты (рис. 150). В отношении вращательного момента количества движения, как вы знаете, тоже справедлив закон сохранения. Пример — закон Кеплера, по которому скорость движения планеты вокруг Солнца при малом радиусе-векторе больше, чем при удалении от Солнца. То же справедливо и для электрона на эллиптической орбите.

Связь орбитального момента со вторым квантовым числом видна из формулы:

$$M = \frac{h}{2\pi}\sqrt{l(l + 1)} = \hbar\sqrt{l(l + 1)}.$$

(Знаком $\hbar$ (читать: «аш-черта») принято для краткости обозначать величину $\frac{h}{2\pi}$.)

Согласно первоначальной теории Бора размеры и форма орбит электронов определялись первым и вторым квантовыми числами. Теперь наука отказалась от орбит определенной формы, заменив их понятием оболочек. Положение электрона в оболочке может быть определено лишь с некоторой вероятностью. Внутри соответствующей оболочки и обращается электрон вокруг ядра.

**Пространственное квантование.** Вспомним любимую детскую забаву — пускание волчка. Посмотрите на вертящийся волчок. Он очень устойчив в своем стремительном кружении, и только когда он израсходует энергию на преодоление сопротивления трения о пол и о воздух, он начнет крениться на бок, но все равно продолжает вращаться, при этом его ось описывает в пространстве коническую поверхность. В науке это явление называется прецессией (рис. 151).

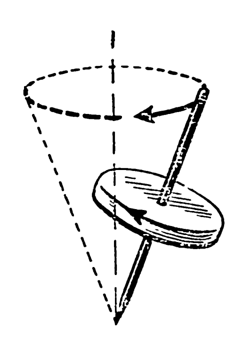


Рис. 151. Прецессия волчка.

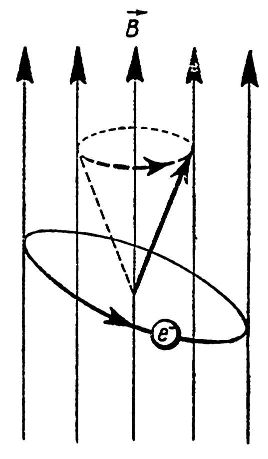



Рис. 152. Прецессия электрона.

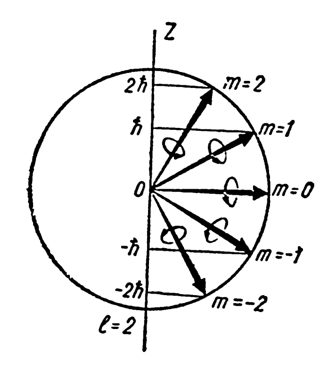



Рис. 153. К понятию магнитного квантового числа.

Движение электрона, обращающегося вокруг ядра, можно рассматривать как круговой электрический ток, подобный току в согнутом в кольцо проводнике. Но, как известно, такой ток сопровождается появлением магнитного поля и, подобно маленькому магниту, отклоняется под действием внешнего магнитного поля. Поэтому если на атом действует внешняя, например магнитная, сила, то вектор вращательного момента тоже начинает прецессировать, описывая в пространстве конус (рис. 152). Это прецессирующее движение связано с энергией, поэтому энергия электрона в магнитном поле изменяется, и это сказывается на спектре светового излучения атома. Внешнее магнитное поле вызывает расщепление энергетических уровней электронов атома, а потому и расщепление спектральных линий.

Изучение изменений энергии электрона в магнитном поле привело к заключению, что вектор орбитального момента может устанавливаться только под строго определенными углами к силовой оси, т. е. его направление тоже квантуется. Разумеется, вместе с изменением угла положения вектора в пространстве изменяется и величина проекции вектора на ось (рис. 153) (за ось принимаем направление магнитного поля — ось $Z$).

Проекция магнитного момента на ось $Z$ — $M_z$ определяет третье, или так называемое магнитное, квантовое число $m$ из соотношения:

$$M_z = \frac{h}{2\pi} m = \hbar m.$$

Другими словами, $m$ измеряет величину проекции момента количества движения электрона на ось.

Магнитное квантовое число может принимать любое целое значение, не превышающее по абсолютной величине $l$ (ведь проекция не может стать больше проецируемой величины):

$$m = 0, \pm 1, \pm 2, \dots, \pm l.$$

Знак «+» или «—» при числе $m$ зависит от того, совпадает ли направление проекции с направлением магнитного поля или же оно противоположно ему. Подсчитав число всех возможных положительных и отрицательных значений $m$ и прибавив еще значение, равное нулю, получим, что каждому числу $l$ соответствует $2l + 1$ разных значений числа $m$. Так, для $l = 2$ может быть 5 значений числа $m$: 0, $\pm 1$, $\pm 2$. Итак, число $m$ характеризует расположение орбит в пространстве.

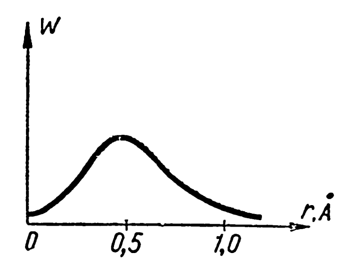


Рис. 154. Вероятность распределения электронов.

**Спин.** Четвертое квантовое число наиболее трудно поддается элементарному истолкованию. Оно называется спиновым квантовым числом и обозначается буквой $s$, $\sigma$ или $m_s$.

Название происходит от английского слова spin (веретено) и связано с отброшенным сейчас представлением об электроне как вращающемся вокруг своей собственной оси шарике, движущемся, кроме того, по орбите вокруг ядра. Наглядной аналогией такому представлению было движение Земли по орбите вокруг Солнца и в то же время ее вращение вокруг собственной оси. Но, повторяем, что от представления об электроне как о маленьком шарике, движущемся по орбите, сейчас наука отказалась. Статистический характер квантовых явлений микромира позволяет нам говорить только о вероятности $W$ обнаружения электрона в сферическом слое (электронной оболочке) на расстоянии $r$ (рис. 154). Приведенный выше расчет, давший для радиуса орбиты электрона значение $r = 0{,}53$ Å, соответствует лишь наибольшей вероятности нахож-

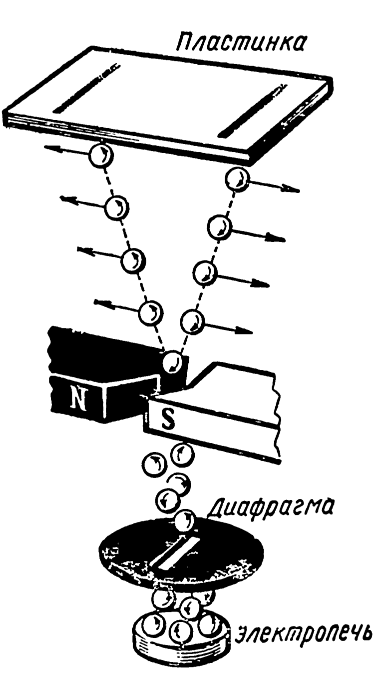


Рис. 155. Схема опыта Штерна и Герлаха.

дения электрона на этом расстоянии, да и сам электрон рассматривается лишь условно как сосредоточенный объект. Поэтому единственно возможное на данном этапе толкование понятия спина — это приписывание электрону наличия у него, кроме орбитального магнитного момента, еще собственного магнитного момента, связанного с каким-то внутренним, еще не раскрытым движением.

В отличие от остальных квантовых чисел спиновое число электрона не целое, а равно $\pm^1/_2$, т. е. оно может принимать только два значения.

Экспериментальное подтверждение наличия спина у электрона дает опыт Штерна и Герлаха. Тонкий пучок атомов серебра, полученный от маленькой электропечи, пропускался через сильное неоднородное магнитное поле (рис. 155) и попадал на пластинку, где осаждался. Вследствие наличия двух противоположно направленных моментов (для наглядности на рисунке электроны показаны шариками с различными направлениями вращения) отклонение электронов магнитом происходило в противоположные стороны, пучок расщеплялся и на холодной пластинке осаждалось вместо одной две полоски серебра.

Мы говорили пока о спине только электрона, но и другие элементарные частицы обладают спином. Например, фотон имеет спин, равный 1, так что его можно принять за единицу измерения спинов других частиц. Некоторые частицы, например мезоны, вообще не имеют спина.

Мы изложили элементарные сведения о квантовых числах, придерживаясь исторического развития квантовой теории. Это позволило придать некоторую наглядность новым для вас понятиям. Однако мы предупреждали, что эти наглядные образы надо понимать лишь условно. Современная физика отошла от этих образов. Сейчас квантовые числа получаются строго из основного уравнения квантового учения — уравнения Шредингера, но мы не можем использовать это уравнение в наших элементарных беседах.

**Принцип Паули.** Атом состоит из положительно заряженного ядра и оболочки обращающихся вокруг ядра электронов. Оболочка подразделяется на несколько слоев, которые принято обозначать буквами $K$, $L$, $M$, $N$, $O$, $P$, $Q$. Не следует смешивать оболочки, или, по первоначальной терминологии, «орбиты», с энергетическими уровнями атома. Так, например, атом водорода имеет одну оболочку, но единственный электрон, принадлежащий этой оболочке, может находиться на различных расстояниях от ядра в зависимости от степени возбуждения и обладать различными уровнями энергии в соответствии с законом квантования.

Все это известно уже из школьного курса физики, известно также, что те сведения, которыми обладает наука о строении атома, не представляют собой надуманную гипотезу, а подтверждены исследованиями спектров и другими экспериментами.

Но не возникал ли у вас вопрос, почему все же электроны в атоме занимают различные энергетические уровни, почему распределение электронов по слоям подчиняется определенной закономерности? Так, установлено, что наибольшее количество электронов в слоях оболочки может быть:

| K | L | M | N | O | P | Q |
|---|---|---|---|---|---|---|
| 2 | 8 | 18 | 32 | 18 | 8 | (от 4 до 8) |

Эта закономерность явно указывает на связь с периодической системой химических элементов.

Почему, подчиняясь закону стремления всякой системы к наиболее устойчивому состоянию с минимальной энергией, все электроны не упадут на самый нижний энергетический уровень? Что за причина наблюдаемого своеобразного порядка размещения электронов по различным этажам атомного дома?

Раздумывая над подобными вопросами строения атома, швейцарский физик Паули в 1924—1925 гг. пришел к мысли, что своеобразие структуры атома получит автоматическое объяснение, если принять следующее ограничительное требование.

Электроны в атоме не могут находиться в одинаковом квантовом состоянии, или, другими словами, в атоме не может существовать нескольких (хотя бы двух) электронов, характеризуемых одной и той же четверкой квантовых чисел.

Если мы уподобим квантовые состояния, следуя образному выражению Паули, отдельным номерам в гостинице «Атомная оболочка», то окажется, что все эти номера одноместные и могут быть заселены каждый одним жильцом электроном.

Чтобы лучше уяснить себе это, давайте прогуляемся по этажам этой гостиницы, начиная с первого ($n = 1$). По знакомому уже нам правилу второе квантовое число $l$ может принять здесь только одно значение $n - 1 = 0$, третье число $m$ тоже равно 0 и только для четвертого $s$ нам предоставляется выбор между $+^1/_2$ и $-^1/_2$.

Итак, в первом слое возможны два набора (различных!) квантовых чисел:

$$1,0,0,+\frac{1}{2} \text{ и } 1,0,0,-\frac{1}{2}.$$

Из элементов периодической системы этим условиям удовлетворяют водород (один электрон) и гелий (два электрона на одной «орбите», но с противоположно направленными спинами).

Переходим во второй этаж. Число $n = 2$. Следовательно, $l = 0$ и 1, $m = 0, \pm 1$, $s = \pm^1/_2$. Комбинируя их в четверки, получим 8 наборов квантовых чисел:

$$2,0,0,+\frac{1}{2}; \quad 2,1,0,+\frac{1}{2}; \quad 2,1,+1,+\frac{1}{2}; \quad 2,1,-1,+\frac{1}{2};$$

$$2,0,0,-\frac{1}{2}; \quad 2,1,0,-\frac{1}{2}; \quad 2,1,+1,-\frac{1}{2}; \quad 2,1,-1,-\frac{1}{2}.$$

В этот этаж попадают все элементы с порядковым номером от № 3 (литий) до № 10 (неон).

Три электрона лития, подчиняясь правилу запрета Паули, размещаются так: два на первой, внутренней «орбите» и один на внешней. Экранированный от притяжения ядра первой оболочкой, этот третий электрон слабее связан с ядром и легко может быть выброшен из системы атома. Потеряв этот внешний, «валентный» электрон, атом превращается в одновалентный ион и в таком виде может вступать в химические соединения.

Десять электронов неона распределятся по схеме $2 + 8$. Неон — инертный газ.

Поднимаемся на третий этаж ($n = 3$). Здесь возможны следующие 18 наборов различных квантовых чисел:

| | | |
|---|---|---|
| $3, 0, 0, +\frac{1}{2}$; | $3, 1, -1, +\frac{1}{2}$; | $3, 2, -1, +\frac{1}{2}$; |
| $3, 0, 0, -\frac{1}{2}$; | $3, 1, -1, -\frac{1}{2}$; | $3, 2, -1, -\frac{1}{2}$; |
| $3, 1, 0, +\frac{1}{2}$; | $3, 2, 0, +\frac{1}{2}$; | $3, 2, +2, +\frac{1}{2}$; |
| $3, 1, 0, -\frac{1}{2}$; | $3, 2, 0, -\frac{1}{2}$; | $3, 2, +2, -\frac{1}{2}$; |
| $3, 1, +1, +\frac{1}{2}$; | $3, 2, +1, +\frac{1}{2}$; | $3, 2, -2, +\frac{1}{2}$; |
| $3, 1, +1, -\frac{1}{2}$; | $3, 2, +1, -\frac{1}{2}$; | $3, 2, -2, -\frac{1}{2}$. |

Сюда поселяются элементы от № 11 (натрий) до № 18 (аргон). Как видите, подтверждение периодической системы получается полное.

Путешествие по дальнейшим этажам вплоть до седьмого было бы утомительным, и мы его проводить не будем. Желающим более детально ознакомиться с порядком расселения электронов рекомендуем прочитать интересную книгу Дж. Орира «Популярная физика» (М., «Мир», 1964, 1965).

Принцип Паули применим не только к электронам, но и к другим элементарным частицам со спином $\pm 1/2$ (протонам, нейтронам, позитронам и др.), но он неприменим к фотонам, обладающим спином 1, и к тем мезонам, у которых спин равен 0.

Возникает вопрос, является ли принцип Паули просто постулатом, взятым с потолка, или он имеет какое-нибудь обоснование?

Сначала (1924—1925 гг.) этот принцип был высказан как постулат, подобно тому как были выдвинуты без доказательства постулаты Бора. Но вскоре Паули, Дирак и другие ученые разработали релятивистскую теорию спина, из уравнений которой автоматически вытекает необходимость принципа Паули. Это связано опять-таки с уравнением Шредингера и волновой

механикой, но мы не можем останавливаться на этих трудных вопросах.

На этом, полагаю, мы должны закончить беседу. Если вы пожелаете глубже заглянуть в микромир, то вам придется обратиться к учебникам высшей школы, а для ознакомительной подготовки я могу рекомендовать следующие популярно написанные книги:

1. К. И. Щелкин. Физика микромира. М., Атомиздат, 1965.

2. Кеннет Форд. Мир элементарных частиц. М., «Мир», 1965.

3. В. И. Рыдник. Что такое квантовая механика. М., «Советская Россия», 1963.

## ПЕРИОДИЧЕСКАЯ СИСТЕМА ЭЛЕМЕНТОВ

18 (6) марта 1869 г. на заседании Русского химического общества было сделано сообщение об открытии Д. И. Менделеевым соотношения свойств с атомным весом элементов. Вывод был сформулирован так: «Элементы, расположенные по величине их атомного веса, представляют явственную периодичность свойств». Несколько позже, через два года, закон был уточнен: «Физические и химические свойства элементов... стоят в периодической зависимости от их атомного веса».

Чисто эмпирический этот закон получил затем теоретическое объяснение в физике и в настоящее время является одним из основных законов природы, величайшим обобщением физики и химии.

Физический смысл периодического закона и составленной на его основе периодической системы ясно обнаружился в 1913 г., когда английский физик Г. Мозли экспериментально доказал, что не атомный вес, а порядковый номер и связанный с ним электрический заряд ядра определяют место элемента в периодической системе.

Исследователи строения атома, известные физики Дж. Дж. Томсон, Э. Резерфорд, Н. Бор при построении своих теорий исходили из периодической системы. Применение законов квантовой механики к периодическому закону еще теснее сблизило физику и химию, а принцип Паули, открытый в 1925 г., дал теоретическое объяснение ранее непонятному ряду цифр (2, 8, 18, 32, ...), определяющему максимальное число электронов на данном энергетическом уровне и лежащему в основе периодических свойств элементов. Современная физика неотделима от периодической системы элементов.

Нам, современникам колоссальных достижений в области химии и физики, периодическая система элементов представляется простой и естественной. Ею пользуются химики в своей

деятельности. Периодическая система проложила совершенно новые пути в физике, в овладении атомной энергией. Но необходимо отдать долг восхищения гениальной прозорливости Д. И. Менделеева, который на основе сравнительно скудных сведений из области химии сумел построить систему элементов, столь совершенную, что она стала служить путеводной нитью не только для химиков и физиков в их работах, но и для специалистов ряда смежных областей.

Чтобы уяснить полнее все величие научного подвига Д. И. Менделеева, необходимо вспомнить, что в то время, когда Менделеев приступал к поискам периодического закона, в химии было известно только 63 элемента, совершенно не были известны инертные газы, так резко очерчивающие границы периодов, в зачаточном состоянии находилось учение о валентности, атомные веса некоторых элементов были определены неправильно.

Смело расположив элементы в порядке возрастания их атомных весов и установив периодичность в повторении химических и физических свойств элементов, Менделеев оставил несколько пустых мест для неизвестных еще элементов. Он даже предсказал и описал свойства трех элементов, открытых позже. Оказалось, что эти элементы — скандий, галлий, германий — точно обладают предсказанными Менделеевым свойствами.

В настоящее время нет незаполненных мест в периодической системе элементов. Удалось не только открыть неизвестные раньше, хотя и существовавшие в природе элементы, но и получить искусственные, отсутствующие на Земле. Первым из них был технеций (№ 48), открытый в 1937 г. Все элементы, следующие за ураном (№ 92), получены искусственно. Сравнительно недавно получен 104-й элемент — курчатовий, названный в честь И. В. Курчатова. В Объединенном Институте ядерных исследований в Дубне ведутся эксперименты по синтезу элемента № 105.

Могут возникнуть вопросы: «Будет ли периодическая система элементов значительно продолжена?», «Можно ли открыть новые элементы, которые займут места внутри таблицы?»

Анализ характеристических рентгеновских спектров позволяет с несомненностью утверждать, что все места внутри таблицы заполнены и появления других элементов, которые можно было бы расположить внутри таблицы, ждать нельзя. Что же касается первого вопроса, то ответ на него получается тоже отрицательным, во всяком случае неограниченное расширение таблицы допустить трудно. Система элементов близка к исчерпанию. И вот почему: появление каждого нового последовательного элемента связано с увеличением заряда ядра. А это вызывает рост кулоновских сил отталкивания между протонами, находящимися в ядре. Для элементов с большим порядковым номером эти силы отталкивания становятся значительными, а ядро — неустойчивым. Кроме того, увеличение заряда ядра должно вызывать уменьшение радиусов «орбит» электронов.

Для элементов с очень большим порядковым номером радиусы первых дозволенных орбит так малы, что ближайшие к ядру электроны будут захватываться им (*К*-захват), а это в свою очередь вызовет превращение протонов ядра в нейтроны и уменьшение заряда ядра. Последнее означает образование нового элемента с меньшим порядковым номером, т. е. сдвиг элемента в таблице Менделеева влево (назад).

Известный американский физик Сиборг считает, что в недалеком будущем возможно еще ожидать открытия элементов вплоть до № 108 или даже 110. Если бы удалось синтезировать элемент № 118, он должен оказаться инертным газом, инертным, но не стабильным, как, впрочем, и все последние элементы периодической системы. Интересно при этом вспомнить, что 101-й элемент — менделевий — имеет период полураспада около 30 *мин*, а курчатовий всего 0,3 *сек*.

Периодическая система элементов, отражая закономерности природы, по мере развития науки будет, конечно, совершенствоваться. Но как символ вечной славы будет сиять в веках имя ее творца Д. И. Менделеева.

## ЗАКОНЫ СОХРАНЕНИЯ КАК ОТРАЖЕНИЕ СИММЕТРИИ

В вечной смене явлений окружающего мира ум человеческий стремится найти нечто постоянное, незыблемое, на что он мог бы опереться, чтобы разобраться в хаосе набегающих на него разнородных впечатлений. В своих поисках простых представлений физики обнаружили несколько фундаментальных законов, известных теперь под названием *законы сохранения*. Это

закон сохранения энергии,
закон сохранения импульса,
закон сохранения момента импульса,
закон сохранения электрического заряда

и несколько законов, касающихся элементарных частиц. В природе возможны только такие процессы, которые не нарушают законов сохранения.

Но нельзя ли свести законы сохранения к чему-то еще более фундаментальному, не отражены ли в этих законах какие-нибудь основные свойства материи и движения? Оказывается, да! В этой беседе мы рассмотрим преимущественно три первых закона, с которыми вы знакомитесь в курсе механики, и покажем, что в них отражаются законы симметрии пространства и времени как основных форм существования материи.

Но прежде всего нам потребуется расширить наше понятие о симметрии. Греческое слово συμμετρια — симметрия имеет значение однородности, соразмерности, гармонии в расположении частей целого. В таком смысле это слово и употребляется в разговорной речи, когда хотят отметить тождественность в расположении геометрических форм какого-либо объекта

природы или искусства. Так мы говорим о симметрии кристаллов, снежинок, бабочек, цветов и других объектов природы.

Но это не исчерпывает понятия симметрии в физике. Самое общее определение симметрии может быть такое: симметрия означает такое свойство объекта, когда путем применения некоторых операций он переходит сам в себя. Как это понять? Какие это операции? Назовем простейшие из них: поворот, зеркальное отражение, перенос. Так, например, если шестиугольную пластинку или звездочку снежинки повернуть на 60° вокруг оси, проходящей через центр правильного шестиугольника, то она переходит сама в себя — сторона $AB$ займет положение $BC$, сторона $BC$ станет на место $CD$, и если нет каких-либо специальных отметок, то образовавшийся новый шестиугольник неотличим от старого (рис. 156).

Начертите печатную букву Н, поворот ее на 180° приводит к совпадению тождественных частей, буква Н симметрична. Вы будете удивлены, если вам скажут, что симметрична и буква И, но у буквы Н есть еще и симметрия отражения; посмотрите на нее в зеркало, и вы увидите ту же букву Н. Буква же И превращается в зеркале в N (символ номера). Известен такой эксперимент-шутка: напишите (печатными буквами) два слова

ГЕЛИЙ НЕОН

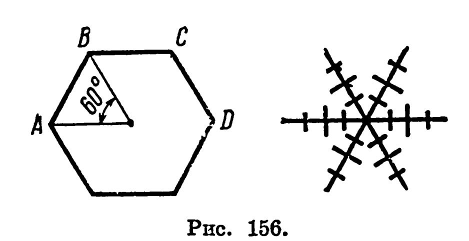



Рис. 156.




Рис. 157.

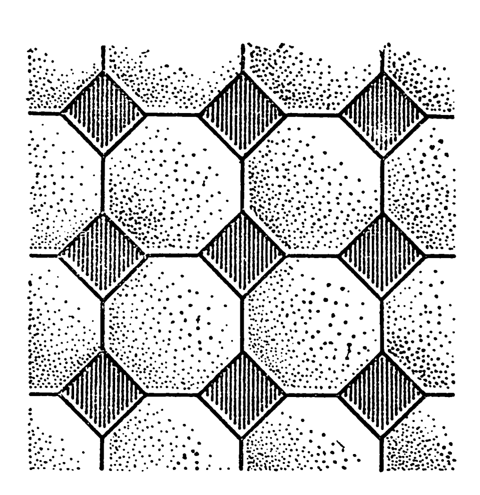


Рис. 158.

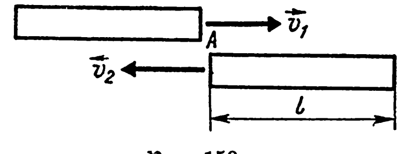



Рис. 159.

(для большего эффекта одно красным, другое зеленым карандашом), предложите товарищам посмотреть на написанное в зеркало. Слово ГЕЛИЙ изменится до неузнаваемости, а слово НЕОН останется без изменения.

Вместо зеркала можно рассматривать эти слова через наполненную водой пробирку. Вот что вы увидите (рис. 157).

Как объяснить это загадочное явление? Симметрией! Разгадка обнаруживается не в таинственных свойствах жидкости в пробирке, а в симметрии — буквы в слове НЕОН все симметричны.

Третья операция — перенос — знакома каждому, кто разглядывал узоры обоев или паркета (рис. 158). Выделив соответствующий участок рисунка (элементарную ячейку), можно простым перекладыванием его получить весь узор.

От соотношений геометрических, отражающих симметрию пространства, обратимся к кинематическим, связанным с движением, т. е. включающим в себя также понятие времени. Известно, что понятие движения имеет смысл только тогда, когда установлена система отсчета, принятая за неподвижную. Всякое движение относительно. Симметрия в данном случае позволяет произвольно выбрать за тело отсчета любое из двух тел, перемещающихся относительно друг друга. Вспомним простейшую задачу на эту тему: «Сколько времени пассажир $A$, сидящий у окна поезда, идущего со скоростью $v_1 = 15$ *м/сек*, будет видеть проходящий мимо него встречный поезд, скорость которого относительно первого поезда $v_2 = -10$ *м/сек*, а длина $l = 150$ *м*?». Мы можем принять за «неподвижное» тело отсчета поезд, в котором находится пассажир-наблюдатель (рис. 159). Тогда скорость встречного поезда $v_{отн} = v_1 + v_2$, а время прохождения $t = \frac{l}{v_{отн}} = 6$ *сек*. Но с таким же правом мы могли принять за неподвижное тело второй поезд. Тогда пассажир пронесся бы мимо него за те же 6 *сек*.

Не забудем, однако, что принцип относительности (или, что то же, принцип симметрии) применим лишь для равномерного движения, для инерциальной системы. Известно, к каким парадоксам приводит некритическое применение принципа симметрии. Так, вызвал и до сих пор вызывает много споров так называемый парадокс близнецов. Напомним его. Один из двух братьев-близнецов отправляется в космическое путешествие со скоростью, близкой к скорости света. Как мы уже говорили в беседе о постулатах Эйнштейна, время на движущемся космическом корабле течет медленнее и путешественник стареет медленнее, чем его брат на Земле. По возвращении космонавта, допустим через 5—10 лет (по его часам), он встретит своего брата-близнеца глубоким стариком. Парадокс, однако, заключается не в этом. Поступим так же, как в предыдущей задаче, т. е. в соответствии с принципом симметрии, позволяющим принимать за тело отсчета любое из двух тел, будем считать неподвиж-

ным космонавта, а Земля с оставшимся на ней братом будет стремительно удаляться от него. Тогда время брата-домоседа будет течь медленнее, и при встрече братьев постаревшим окажется близнец, сидевший в кабине космического корабля. Парадокс близнецов не биологический, а логический. Создается нелепое положение: оба близнеца оказываются старше один другого! Но не подумайте, что это опровержение теории относительности Эйнштейна. Замедление времени для движущегося объекта — факт, проверенный экспериментально (на жизни прилетающих на Землю мезонов, на эффекте Мессбауера). Парадокс возник из-за неправомерного применения принципа симметрии и закона специальной теории относительности к двум различным системам: инерциальной и неинерциальной. Для возвращения космонавт должен был повернуть свой корабль, т. е. изменить его скорость движения на противоположную, значит, сообщить ему ускорение. Поэтому система, связанная с ним, является неинерциальной. Более строгий анализ, разрешающий парадокс, относится, впрочем, не к специальной, а к общей теории относительности, и мы его касаться в нашей беседе не будем.

В природе все находится в состоянии непрерывного изменения (движения). Все эти изменения происходят в пространстве и во времени, иными словами, о любом явлении можно сказать, что оно происходит в каком-то месте (где?) и в какое-то время (когда?). Пространство и время непосредственно связаны с материей и ее изменениями, или, выражаясь философским языком, являются формами существования материи.

Отличаются ли чем-нибудь отдельные точки пространства одна от другой? Отличаются ли моменты времени один от другого? Естественно, что ответ на оба вопроса один: нет! Пространство и время обладают однородностью. Это и есть в самом широком смысле симметрия материи. Законы физики одинаковы для любой точки пространства и для любого момента времени. Никакая наука не была бы возможна, если бы законы механики были бы в одном месте одни, а в другом — другие, сегодня вечером они отличались бы от тех, какие были утром или какими станут завтра (речь, конечно, идет не о формулировке закона и не о смысле, вкладываемом на данном этапе развития науки в содержание понятия, а о самих явлениях).

Иллюстрировать, например, связь закона сохранения импульса с однородностью пространства можно на следующем эксперименте. Направим навстречу друг другу две одинаковые монеты с одинаковой скоростью на гладкой горизонтальной плоскости. По закону сохранения импульса они после столкновения разлетятся в противоположные стороны с такими же по величине скоростями (рис. 160, *а*). Но это произойдет только при условии однородности пространства.

Если же в пространстве имеются неоднородности: для простоты предположим, что оно состоит из двух частей, в одной из

которых инертная масса монеты больше, чем в другой), то картина будет иная. Если соударение происходит целиком в той или другой однородной части пространства, то симметрия явления не нарушится. Но пусть удар произойдет на границе этих двух областей пространства, тогда выступает явная асимметрия (рис.160, *б*).

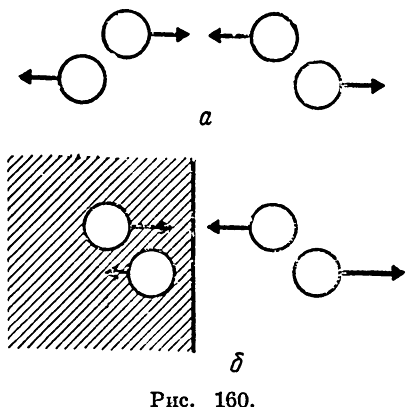


Рис. 160.

Конечно, это только иллюстрация, а не доказательство связи закона сохранения импульса с однородностью пространства. Доказательство потребовало бы от нас знания так называемой вариационной механики, что далеко выходит за пределы наших бесед.

Рассмотренный пример можно использовать и для иллюстрации зависимости закона сохранения энергии от однородности времени. Действительно, и до и после удара абсолютно упругих тел (когда нет ни остаточной деформации, ни нагревания) сумма энергий остается постоянной (см. беседу «Импульс — значит удар» в I части).

Таким образом, два основных закона поступательного движения являются следствием однородности пространства (закон сохранения импульса) и однородности времени (закон сохранения энергии).

Закон сохранения момента импульса, являясь законом вращательного движения, связан с изотропностью пространства или симметрией направлений. Пространство изотропно — это значит, что происходящие в нем процессы не зависят от направления. Изображая какой-нибудь процесс в некоторой системе координат, мы можем повернуть эту систему на любой угол, при этом значение момента импульса остается неизменным (быть может, лучше говорить о сохранении углового или вращательного импульса, но пока более распространенным остается термин «сохранение момента импульса» или даже просто «сохранение момента»).

Итак, все три фундаментальных закона сохранения связаны с основными свойствами симметрии как отражением свойств материи. Отсюда их всеобщность.

Если из макромира мы перенесемся в микромир, то и там мы не найдем нарушения этих трех законов сохранения. Когда в истории физики встречались случаи кажущегося несоблюдения какого-нибудь из законов сохранения, это заставляло ученых искать причины нарушения и всегда приводило к новым сенсационным открытиям. Таким сенсационным открытием, например, было открытие нейтрино при анализе энергетическо-

го баланса β-распада (см. беседу «Продолжительность жизни атома»). Другие законы сохранения, специфичные только для микромира элементарных частиц, привели к открытию позитрона, антипротона и позволили разработать систематику элементарных частиц. Элементарные частицы являются основным объектом исследований в современной физике.

Для микромира законы сохранения энергии, импульса и момента нашли свое выражение в характеристике квантового состояния системы с помощью известных квантовых чисел ($n$, $l$, $m$, $s$)*. Мы не будем повторять того, что было сказано об этом в нашей беседе о квантах, желающие могут вернуться к этой беседе и проверить, с каким из законов сохранения связано каждое из этих чисел.

Остановимся вкратце на законах сохранения (симметрии), специфичных только для элементарных частиц.

Прежде всего это закон тождественности частиц того или другого вида. Так, первая из элементарных частиц — электрон лишен индивидуальности и совершенно неотличим от любого другого электрона. Но в то же время для каждой элементарной частицы имеется ее двойник — античастица. Масса, время жизни, спин одинаковы у частицы и ее античастицы. Различаются они только знаком заряда или направлением магнитного момента. Таковы электрон $e^-$ и позитрон $e^+$, протон $p$ и антипротон $\tilde{p}$**. Только две частицы из пока известных элементарных частиц — фотон $\gamma$ и $\pi^\circ$-мезон — считаются тождественными со своими античастицами. Пусть читателю не покажется такое тождество искусственным, придуманным только для соблюдения закона «зарядового сопряжения», как называют симметрию частиц и античастиц. Ведь и при отражении в реальном зеркале возможно полное тождество предмета и его отражения; например, шар неотличим от его изображения в зазеркалье.

Есть еще разновидность зеркальной симметрии в мире элементарных частиц, называемая четностью. Случаи нарушения закона сохранения четности при β-распаде были одним из драматических моментов в истории физики. Отголоски «крушения четности» сказываются еще и в наши дни. Читатель, возможно, знаком с этим вопросом из популярной литературы, где это описывается под названием «загадка тау-тэта». Однако считаем, что не лишними будут нижеследующие пояснения.

Прежде всего, что такое «четность»? Понятие четности заимствовано из математики. Функция $y = x^2$ (и все четные степени $x$) называется четной, потому что не изменяется при замене $x$ на $-x$; $y = x^2 = (-x)^2$, в то время как $y = x^3$ — функция

---

* См. статью «На пороге микромира».

** Античастицы обозначаются той же буквой, что и частицы, с добавлением тильды «~» или черточки над этой буквой, в некоторых случаях ставится знак заряда.

нечетная; при замене $x$ на $-x$ знак функции изменится: $y = x^3 = -(-x)^3$.

Точно так же $\cos x = \cos(-x)$ — функция четная, а $\sin(x) = -\sin(-x)$ — нечетная.

Начертите графики функций $\cos x$ и $\sin x$ (от $0°$ до $2\pi$) и посмотрите на них в зеркало (рис. 161). Вы увидите: изображение графика $\cos x$ в зеркале совпадает со своим дозеркальным изображением, а графика $\sin x$ нет.

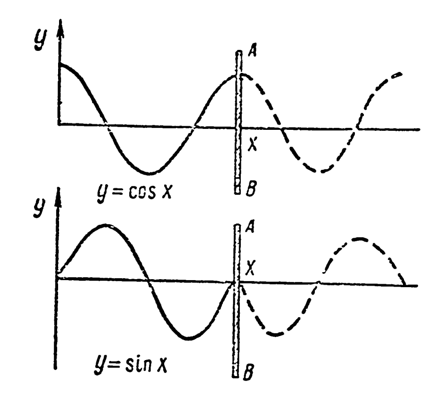



Рис. 161.

В квантовой механике движение частиц определяется, как мы знаем, волновой функцией $\psi(x, y, z)$. По отношению к этой функции понятие четности понимают следующим образом. Если после применения зеркальной симметрии и замены $x$, $y$, $z$ на $-x$, $-y$, $-z$ движение частицы, описываемой новой функцией, не будет отличаться от прежнего движения, то функцию считают четной. Условно это обозначается символом $+1$, нечетную функцию обозначают $-1$.

Понятие четности функции связывается с симметрией зеркального отражения или «право-левой симметрией». Только не надо это понимать так наивно, будто вопрос о четности или нечетности решается путем применения зеркал. Исследование свойств частицы — это большая и далеко не простая задача. По тысячам фотографий следов заряженных частиц в камере Вильсона или пузырьковой камере опытный специалист определит и массу, и заряд, и направление полета частицы. Для этого ему придется измерить и толщину следа, и направление, и кривизну траектории, а по ее длине судить о продолжительности жизни частиц (рис. 162). Мы настоятельно рекомендуем читателю для ознакомления с методами изучения элементарных частиц прочитать превосходно написанную книгу И. М. Беккермана «Невидимое оставляет след» (М., Атомиздат, 1970).

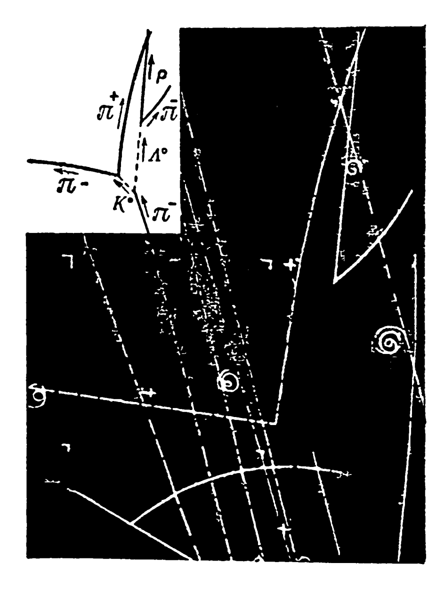



Рис. 162.

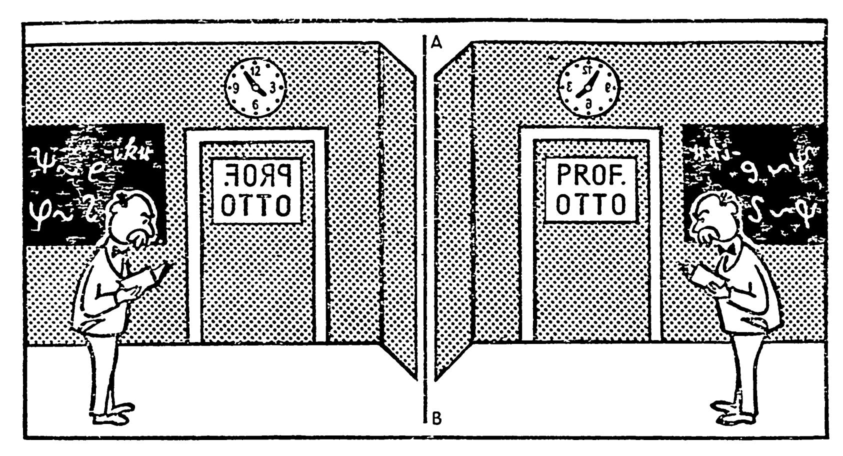



Рис. 163.

Исследование следов элементарных частиц позволяет решить и вопрос о четности или нечетности частицы.

Но нас особенно интересует «закон сохранения четности», поскольку вся наша беседа касается законов сохранения. В чем же состоит этот закон? Если в результате реакции (столкновения, распада) образуется несколько новых частиц, то, как об этом свидетельствует опыт, суммарная четность их сохраняет знак четности (+ или —) частиц до реакции. Заметим только, что суммарная четность определяется не сложением, а перемножением составляющих четностей.

Но посмотрите, к какому удивительному выводу приводит этот закон сохранения, если использовать понятия правой и левой симметрии. Логическим выводом из него следует, что нельзя отличить правое от левого! Рисунок 163 поясняет это. Перенесенный в мир зазеркального отражения, профессор Отто не замечает перемены. Для вас, смотрящих из предзеркалья, в зеркале правое сменяется на левое — формулы на доске и надпись на дверной табличке стали неузнаваемыми. Но перенеситесь в зазеркалье, и вы вместе с профессором увидите все в нормальном виде (ведь, перейдя в зазеркалье, вы еще раз испытали симметричное изменение). Книга у профессора в правой руке, дверь от него налево, доска направо, с его точки зрения, надпись на входной двери, сделанная снаружи, опять видна наизнанку. Значит, в природе нет различия между правым и левым, это просто антропоморфические понятия, связанные с некоторой асимметрией нашего организма (сердце находится слева).

И вдруг этот, казалось бы такой естественный, закон оказался нарушенным в мире элементарных частиц при β-распаде в сфере так называемых слабых взаимодействий. Два вида *К*-мезонов, получившие специальные названия тау (τ) и тэта

(θ), оба обладающие одинаковыми свойствами и оба отрицательной четности, распадаются: тау — на три, а тэта — на два пи-мезона с отрицательной четностью. Суммарная четность продуктов распада для тау-частицы: (—1) (—1) (—1) = —1, для тэта-частицы: (—1) (—1) = + 1. А исходная четность обеих частиц была —1. Тэта-частица оказалась нарушителем закона сохранения четности. Позже были найдены и другие случаи нарушения этого закона, но тоже только для слабых взаимодействий. Можете представить, каким «потрясением основ» было это открытие! Мир терял свою симметричность! Мир оказался левым! Советский академик Л. Ландау пытался спасти положение, введя понятие комбинированной четности. Если, кроме зеркального отражения, произвести замену частиц на античастицы, то сохранение такой комбинированной четности будет соблюдено и при слабых взаимодействиях. Однако восстановленное спокойствие вскоре было нарушено; поступили сигналы, что и сохранение комбинированной четности не является абсолютным. Надо ждать новых сенсационных открытий. Крупнейшие научные силы брошены на этот фронт. Сверхмощная техника как у нас, так и за рубежом используется для разрешения все еще остающихся загадок мира элементарных частиц. Мы не можем дольше останавливаться на этом вопросе. Целью нашей беседы было только показать, что законы сохранения (мы рассмотрели некоторые из них) отражают более глубокие, фундаментальные свойства материального мира, проявляющиеся в его симметрии, показать, какие заманчивые перспективы сулит проникновение в тайны элементарных частиц.

## ГРАНИЦЫ ПРИМЕНИМОСТИ КЛАССИЧЕСКОЙ, РЕЛЯТИВИСТСКОЙ И КВАНТОВОЙ МЕХАНИКИ

От гигантских звезд и звездных скоплений до невидимых атомов и еще более мелких элементарных частиц — таков диапазон познания человеком Вселенной. В процессе познания ученый сталкивается с поражающим на первый взгляд контрастом макро- и микромира — мира больших тел и сравнительно небольших скоростей и мира малых объектов и огромных, приближающихся к скорости света скоростей.

Естественно, что человек сначала познакомился с макромиром, постепенно приближаясь к его границам в одну сторону при помощи телескопов, а в другую — при помощи микроскопов.

Законы Ньютона, представляющие собой обобщения многовекового человеческого опыта, легли в основу так называемой классической механики. Бесспорная правильность этих законов, казалось, подтверждалась всеми научными и техническими применениями. По законам классической механики можно было строить сложные машины и механизмы, по законам механики Ньютона можно было рассчитывать движение планет. Понятия

классической механики совпадали с нашими привычными понятиями о явлениях окружающего мира.

Однако дальнейшее развитие наук, особенно с конца XIX и начала XX века, привело к открытию микромира со всеми его парадоксальными с точки зрения здравого смысла особенностями. Это мир атомов и еще более мелких частиц, мир, в котором скорости в тысячи раз превышают самые большие скорости макромира.

Классическая механика в микромире и для околосветовых скоростей оказалась неприменимой — открытие нового мира потребовало создания новой науки. Возникли релятивистская механика и квантовая механика. Релятивистская механика, основанная на теории относительности, применима к скоростям, близким к скорости света, а квантовая — к миру атомов и элементарных частиц.

Было бы, однако, ошибкой думать, что новая физика зачеркивает классическую физику или заменяет ее. Мы лучше поймем взаимоотношения между классической, релятивистской и квантовой физикой, если взглянем на ход развития физических идей как на исторический процесс все большего углубления нашего познания окружающего мира. Человеческий ум не в силах постичь в едином акте истину раз и навсегда. Познание идет путем все большего углубления и обобщения отдельных приближений к истине. Сначала возникает общая картина целого, не расчлененного на детали, подобно тому как путнику лес на горизонте представляется сплошным массивом. Задачей науки на этом этапе является установление общих закономерностей между внешними, доступными непосредственному восприятию явлениями. Суждения о внутренней сущности здесь пока еще преждевременны. «Гипотез я не измышляю» — это знаменитое изречение Ньютона как раз и характеризует феноменологический* подход классической физики к изучению конкретных явлений. Идеи непрерывности, идеи функциональной зависимости вполне соответствуют этому этапу развития науки.

Продолжая нашу аналогию с путником, вступающим в лес и с удивлением обнаруживающим раскрывающееся перед ним разнообразие внутри прежде единого целого, мы в этапах развития науки наблюдаем переход от рассмотрения целого к изучению отдельных составных частей. Такая деталировка не есть разрушение прежнего знания. Разве перестал лес быть лесом от того, что мы, войдя в него, стали различать отдельные деревья, кусты и обнаружили все пестрое его население? Разве молекулярно-кинетическая теория со специфическими для нее статистическими закономерностями отвергла такие макроскопические понятия, как давление, объем, температура газа? Макроскопические величины могут быть выведены как усредненные из микроскопических: например, температуру мы рассматри-

---

* От греческого *феноменон* — являющийся, *логос* — изучение.

ваем как меру средней кинетической энергии молекул, но, пользуясь понятием температуры в термодинамике, мы отвлекаемся от молекулярно-кинетических представлений. Выводы новых теорий, возникших под напором неумолимых фактов, вскрытых благодаря все возрастающему искусству эксперимента, не отвергают выводов, полученных без учета этих новых фактов. Поэтому при введении некоторых ограничительных условий новые теории переходят в «классические», являющиеся, таким образом, частным случаем более общих новых теорий. История науки — это не ряд катастроф, при которых рушатся добытые раньше знания, история науки — это прогрессирующее движение вперед к познанию мира. В нашем процессе познания мы идем к абсолютной истине через ряд последовательных относительных истин, справедливых на соответствующем этапе или при соответствующих ограничительных условиях.

Физика XX века — теория относительности и квантовая механика — не отвергает классическую физику. Уравнения Эйнштейна, де Бройля и Шредингера, охватывающие картину мира в более широком аспекте, при некоторых ограничительных условиях переходят в уравнения классической физики макромира.

Рассмотрим релятивистскую формулу массы:

$$m = \frac{m_0}{\sqrt{1-\left(\frac{v}{c}\right)^2}}.$$

При уменьшении отношения $\frac{v}{c}$ до нуля, что может быть достигнуто или при $v = 0$ (покой), или при $c = \infty$ (идея мгновенного распространения света), масса становится величиной постоянной ($m = m_0$), как это и признавалось в классической механике до Эйнштейна.

Рисунок 164 показывает, как релятивистская масса асимптотически приближается к классической по мере уменьшения отношения $\frac{v}{c}$. Правда, скорость света была измерена уже в XVII веке и оказалась не бесконечной, но скорости, с какими имела дело техника вплоть до эры атомного века, были настолько малы по сравнению со скоростью света, что колебания в величине массы не могли быть обнаружены имеющимися измерительными средствами.

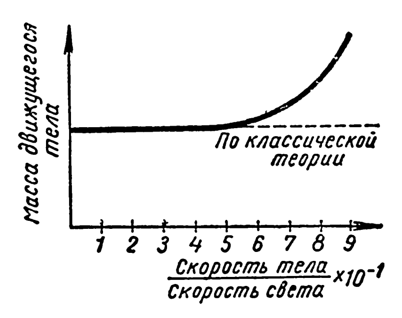



**Рис. 164. Релятивистская масса асимптотически приближается к классической.**

В современных ускорителях развиваемые частицами скорости приводят уже к многократному

увеличению массы. Это твердо установленный факт используется в современных исследованиях атомного мира.

Известное соотношение $E = mc^2$ дает для массы тоже переменное значение:

$$m = \frac{E}{c^2}.$$

Скорость света есть величина постоянная, но сообщаемая телу извне энергия (хотя бы нагреванием) должна сказываться на величине массы.

Однако попробуйте подсчитать, на сколько увеличится масса десятикилограммовой чугунной гири, если вы ее нагреете на 100° С, сообщив ей количество теплоты $Q = cm\,(t_2 - t_1)$ (здесь $c$ — удельная теплоемкость чугуна, $c = 0{,}46 \cdot 10^3 \frac{дж}{кг \cdot град}$),

$$Q = 0{,}46 \cdot 10^3 \frac{дж}{кг \cdot град} \cdot 10\ кг \cdot 100° = 46 \cdot 10^4\ дж.$$

Подставляя это значение в формулу массы, получим:

$$m = \frac{46 \cdot 10^4\ дж}{9 \cdot 10^{16} \frac{м^2}{сек^2}} = 5 \cdot 10^{-12}\ кг.$$

$5 \cdot 10^{-6}$*мг*! Разумеется, эта величина практически неощутима и в расчетах по тепловому балансу изменение массы не учитывается.

О релятивистской формуле сложения скоростей мы уже говорили (беседа «Постулаты Эйнштейна»):

$$v = \frac{v_1 + v_2}{1 + \frac{v_1 v_2}{c^2}}.$$

Для движения со скоростью света (фотон, нейтрино) эта формула приводит к парадоксальному выводу:

$$v = \frac{c + c}{1 + \frac{c \cdot c}{c^2}} = c,$$

т. е. два фотона, обладающих каждый скоростью $c$, при движении навстречу друг другу сближаются не со скоростью 2 $c$, как этого требовал бы здравый смысл, а все с той же скоростью $c$! Ведь скорость света по теории относительности есть предельная, максимальная скорость. Но для скоростей, с какими имеет дело классическая механика, отношение $\frac{v_1 v_2}{c^2}$ при огромности знаменателя $c^2$ близко к нулю, и, пренебрегая этим отношением,

мы получим классическую формулу геометрического сложения скоростей

$$\vec{v} = \vec{v}_1 + \vec{v}_2,$$

а в общем случае — правило параллелограмма.

Итак, все дело в предельном значении и огромной величине скорости света. Приближение к околосветовым скоростям приносит нам сюрпризы релятивистской механики, при «обычных» же скоростях теория относительности не вносит существенных изменений в формулы классической механики: законы Ньютона остаются тогда в их неприкосновенном совершенстве.

С другим ограничительным условием для применения классической физики мы встречаемся в квантовой механике.

Но если в релятивистской физике границы применимости были связаны с огромностью и постоянством скорости света, то квантовая механика воздвигает для нас границы применения классической физики, связанные с малостью постоянной Планка ($h = 6{,}62 \cdot 10^{-27}$ *эрг·сек*). Волновые свойства материи, которых не знает классическая физика, характеризуются длиной волны де Бройля:

$$\lambda = \frac{h}{p}, \text{ или } \lambda = \frac{h}{mv}.$$

Чем короче длина волны, тем больше импульс $p$ — основная характеристика материальной частицы, и, наоборот, увеличение импульса (или скорости) приводит к уменьшению длины волны, т. е. ослаблению волновых свойств. Для микромира с его частицами малой массы длина волны достигает размеров, позволяющих измерить ее и обнаружить волновую природу частиц (хотя бы в явлении дифракции). В макромире вследствие чрезвычайной малости $h$ длина волны получается исчезающе малой.

Так, если человек средней массы идет со скоростью 5 *км/ч*, то длина соответствующей волны получается порядка $10^{-33}$ *см*. Попытка двигаться медленнее, чтобы увеличить длину волны, не принесет большого успеха. Если бы человек передвигался со скоростью 1 *см* в столетие, то его длина волны оставалась бы меньше $10^{-21}$ *см*, т. е. все еще в 100 миллионов раз меньше размеров элементарных частиц*.

Решающее значение в вопросе о границах применимости классической механики в мире малых частиц имеет «соотношение неопределенностей», о котором мы упоминали в беседе «На пороге микромира».

Принцип неопределенности утверждает, что в микромире невозможно одновременно точно указать координаты микрочастицы и ее скорость (или импульс). Таким образом, в микро-

* Пример заимствован из книги К. Ф. Форда «Мир элементарных частиц» (М., «Мир», 1965).

мире теряют смысл такие фундаментальные понятия макромира, как траектории.

Математически соотношение неопределенности можно записать так: $\Delta p \Delta x = \hbar$, где $\Delta p$ и $\Delta x$ — неточности (неопределенности) в значении импульса и координаты, а

$$\hbar = \frac{h}{2\pi}.$$

Пусть вас не смущают эти обозначения.

Вместо $\Delta p$ можно написать $m\Delta v$ и придать соотношению иную форму:

$$\Delta v \Delta x = \frac{\hbar}{m}.$$

Если импульс частицы известен точно (или, другими словами, если неточность равна нулю, $\Delta p = 0$), то $\Delta x = \frac{h}{0} = \infty$ , т. е. координаты совершенно неопределенны.

В классической механике, где импульс и координаты вполне определенны, соотношение $\Delta p \Delta x$ обращается в нуль.

Чем ближе мы к этому предельному случаю, тем с большим правом мы можем применять законы классической механики. Не делая вычислений, приведем результаты для двух примеров:

для дробинки массой в 1 *г* $\Delta v \Delta x = 6{,}6 \cdot 10^{-27}$ такая неточность в макромире неощутима;

для электрона же, масса которого порядка $10^{-27}$ *г*, $\Delta v \Delta x \approx 6$, и если принять, что неточность в определении координаты равна размеру самого атома, в системе которого обращается электрон, т. е. в пределах $10^{-8}$ *см*, то неточность в определении скорости

$$\Delta v = 6 \cdot 10^{-8} \text{ см/сек} = 6 \cdot 10^{-6} \text{ м/сек}!$$

Ясно, что для исследования поведения электрона в атоме классическая механика совершенно неприменима.

В заключение рассмотрите график, наглядно иллюстрирующий идеи нашей беседы (рис. 165).

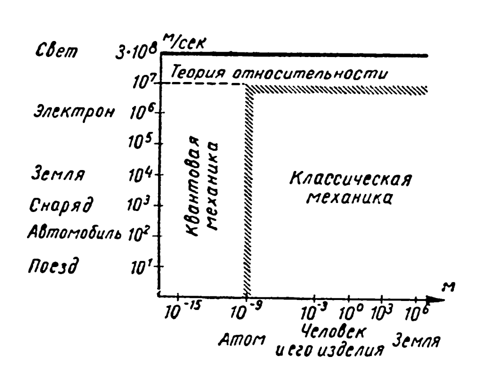


**Рис. 165.** Границы применимости классической механики.

По вертикали отложены скорости от 0 до предельной максимальной, т. е. скорости света. Слева—примеры реальных объектов.

По горизонтали —размеры и соответственно примеры объектов. Границы между областями применимости, конечно, условны и расплывчаты, что показано штриховкой.

Только при скорости, большей десятков тысяч километров в секунду, нельзя применять законы классической

механики, а надо обратиться к механике релятивистской, равно как приходится пользоваться квантовой механикой, имея дело с объектами атомного мира. Входя же в область внутри штрихованных границ, мы попадаем в наш обычный, наш уютный, наш любимый макромир.

## ЭТАПЫ РАЗВИТИЯ ФИЗИКИ НА МАСШТАБНОЙ СЕТКЕ МИРОВОЙ ИСТОРИИ

Даже мерцание звезд, кажущихся столь недосягаемыми и индифферентными, сообразуется с социальной системой своего времени и с определяющими ее экономическими силами...

(Ж. Жорес. Речи.)

На протяжении всех наших бесед перед вами проходили образы великих людей, создававших физическую науку, — Аристотеля, Галилея, Ньютона, Ломоносова, Роберта Майера, Максвелла и других. Теперь в заключительной главе полезно будет дать общий обзор этапов развития физики на фоне общей истории человеческого общества и истории его культуры.

Следует предупредить читателя, что эта беседа не претендует быть даже кратким очерком истории физики, а является лишь схемой важнейших этапов ее развития. Существуют подробные, хорошие книги по истории физики (Б. И. Спасского, П. С. Кудрявцева и др.)*, к которым интересующиеся могут обращаться за более детальной информацией. Сохраняя общий план наших бесед, мы сочли необходимым придерживаться в основном школьного курса, и потому силуэты великих ученых, обрисованные на страницах этой главы, — это образы (в большинстве случаев) тех творцов физической науки, о которых упоминают учебники средней школы. Иногда мы называем только их имена, предлагая читателям самим вспомнить, с какими разделами и вопросами физики связаны работы данных ученых. Основная цель нашей беседы — создать в представлении читателя историческую перспективу и тем самым предостеречь от анекдотических ошибок в оценке событий и фактов истории физической науки. Физика должна предстать перед вами не как застывшая,

* Б. И. Спасский. История физики, ч. I и II. Изд-во МГУ, 1964; П. С. Кудрявцев. История физики, т. 1—3. М., 1956—1971; П. С. Кудрявцев и И. Я. Конфедератов. История физики и техники. М., Учпедгиз, 1960.

неизменяющаяся наука, а как постоянно развивающаяся в непосредственной связи с развитием общества и его производительных сил.

Новое открытие, новый этап в развитии науки связаны как с потребностями человеческой практики, так и с наличием соответствующей теоретической и технической подготовленности. Паровые машины и двигатели внутреннего сгорания не могли появиться в древней Греции не только потому, что рабовладельческое общество с его низким уровнем производства не нуждалось в таких машинах, но и потому, что в то время само понятие газа или пара было еще крайне неясным, не говоря уже о понимании связи между теплотой и работой. Эолипил* Герона, александрийского ученого II века до н. э., нельзя считать ни моделью, ни прообразом паровой турбины. Это была просто забавная игрушка, не предназначенная для совершения работы, так же как и другие приборы и автоматы этого античного изобретателя.

Наоборот, когда открытие подготовлено всем предыдущим развитием науки, а потребности производства властно требуют его появления, то идеи как бы «носятся в воздухе» и очень часто не один, а сразу несколько изобретателей становятся выразителями этих идей. Закон Бойля — Мариотта, закон Джоуля — Ленца — хорошо известные вам примеры такого одновременного открытия. Напомним еще об упоминавшихся в ваших беседах досадных спорах о приоритете между великими современниками — Ньютоном и Лейбницем (по поводу открытия анализа бесконечно малых), Робертом Майером и Джоулем (об открытии закона сохранения энергии).

Развитие физики сложными связями переплетается с развитием других наук (математики, химии, астрономии) и со всем ходом развития человеческого общества. Для того чтобы получить правильную картину этапов развития физики, мы воспользуемся масштабной сеткой всемирной истории в ее хронологической последовательности. Это позволит вам лучше понять значение тех или иных открытий, законов и теорий, и вы лучше сумеете оценить величие их творцов. Связь открытий с достигнутым уровнем развития науки и с потребностями человеческой практики, а теории с идеологией (общественным сознанием) эпохи позволит вам глубже понять содержание нашей науки и ее методов.

Наивно было бы думать, что смена общественных формаций, а с ней и история материальной культуры шла единым фронтом и в ногу, одновременно во всем мире. Нет, история общества развивалась неравномерно. В силу различных причин отдельные страны в некоторые периоды забегали вперед, но затем в свою очередь оказывались отставшими. Даже сейчас различные народы находятся на различных ступенях развития, начиная от

---

* *Эолипил* — шар, вращающийся под действием вытекающего пара.

стадии дикости (некоторые племена в резервациях на севере Австралии) и до высоких форм социализма.

Это не помешает нам, однако, соблюдая вышеизложенные принципы материалистического понимания истории, набросать общую картину этапов развития физики.

История всегда очень интересна: почти сказочный и героический характер ее повествований волнует наше воображение, унося нас в даль давно прошедших веков. Не путешествие ли это на волшебной машине времени, о которой так много писали фантасты всех времен и народов? Итак, начинаем наше путешествие.

## 1. В дали веков. Накопление физических знаний. Угасшие культуры Востока

Наука давно отвергла библейские сказки о сотворении человека и о первых райских днях его жизни. Нет, далеко не райской была эта жизнь. Слишком слаб и беспомощен перед лицом окружающей природы был наш предок.

Люди тогда не умели еще с огнем обращаться, и шкуры,
Снятые с диких зверей, не служили одеждой их телу.
В рощах, в лесах или в горных они обитали пещерах.
Всякий, добыча кому попадалась, ее произвольно
Брал себе, о себе лишь одном постоянно заботясь...
Диких зверей по лесам они гнали и били
Крепким тяжелым дубьем и бросали в них меткие камни.
Многих сражали они, от иных же старались укрыться.
Телом своим загрубелым, подобно щетинистым вепрям,
Наземь валилися спать нагишом с наступлением ночи
Или зарывшись в листву или ветви густые деревьев...

Такую, довольно правдоподобную, картину жизни первых людей рисует римский поэт Лукреций. Жизнь, когда каждый день — проблема и каждая ночь — ужас...

Сколько случайностей, сколько неудач, опасных встреч, кончавшихся иногда гибелью человека, сопровождало жизнь первобытных в лесу! Но эти же удачи и неудачи приводили к накоплению опыта, к элементарному осознанию человеком своих взаимоотношений с внешним миром. Тысячи раз, когда человек сталкивался с какой-нибудь закономерностью в природе, она оставалась незамеченной, но рано или поздно в уме человека устанавливалась связь явлений, и это было началом познания. Разумеется, это было еще темное, почти инстинктивное знание.

Весьма важным фактором в становлении человека было объединение людей в групповые сообщества. Сообща веселее и легче собирать пищу в лесу и безопаснее себя чувствуешь от всюду тебя подстерегающих хищников.

Совместная жизнь должна была привести к образованию языка, так как без взаимного обмена мыслями и впечатлениями

просто невозможен был бы и совместный труд, как бы примитивен он ни был. Совместный труд и членораздельная речь оказали решающее влияние на развитие мышления. Но все это не так просто и все это требовало многих тысяч лет.

Наши обычные меры времени — год и даже век — оказываются слишком малыми для того, чтобы мы могли охватить воображением перспективу истории. Для наглядности воспользуемся другим, более крупным масштабом, так называемым галактическим годом, т. е. периодом обращения Солнца вокруг центра нашей звездной системы (галактики). Такой период равен примерно 200 млн. лет. Тогда история нашей Земли и, в частности, история человека предстанет в таком плане:

Рождение Солнца из газопылевой туманности — 5 — 6 млрд. солнечных лет, или 25—30 галактических.

Образование твердой земной коры — 8 галактических лет (вместо 1,5 млрд. солнечных).

Появление простейших форм жизни в морях — 1 млрд. солнечных, или 5 галактических лет.

Знойное лето молодой Земли, гигантские папоротниковые леса, земноводные чудовища (ихтиозавры и динозавры), а затем период оледенения и вымирания гигантов. Ледниковые периоды сменяются последующими потеплениями. Последний ледниковый период, в конце которого появляется человек, отдален от нас на миллион лет, или всего на 48 часов по галактическому исчислению времени.

Еще много тысячелетий потребовалось, чтобы человек от примитивных орудий перешел сначала к грубой, а потом тонкой обработке камня. Давность применения металла (меди, потом железа) в галактическом летосчислении выразится уже минутами.

Первые астрономические наблюдения в Халдее — 5 — 6 тысяч солнечных лет тому назад, или 15 галактических минут.

Зарождение экспериментальной физики. Первый телескоп Галилея (1610 г.) — 1 галактическая минута.

Начало новейшей физики (квантовая теория и теория относительности (1900—1905 гг.) — 1 галактическая секунда.

Однако без предшествовавшего длительного периода накопления жизненного опыта не могла бы возникнуть ни классическая, ни современная физика. Законы Ньютона — основа классической механики — представляют обобщение многовекового человеческого опыта, а теория относительности и квантовая механика возникли как теоретическое продолжение, экстраполяция классической физики в область околосветовых скоростей и мир микрообъектов.

Когда мы подойдем к более детальному рассмотрению отдельных этапов развития физики, мы вынуждены будем снова вернуться к обычному летосчислению. При этом мы будем рассматривать параллельно и события общественной жизни в их

политических и экономических связях. В сложном переплетении этих событий история физики предстанет перед нами как неизбежный, закономерный процесс.

Остановим пока наше внимание на важнейших факторах, определивших общее развитие цивилизации человеческого общества.

Прежде всего употребление огня. Научившись добывать и применять огонь, человек значительно смягчил условия своей жизни. Это была величайшая победа человека, таившая в зародыше основы промышленности и технического прогресса. С нею связано добывание металлов, а следовательно, переход от простого собирания пищи и охоты к земледелию. Земледелие неизбежно связано с оседлой жизнью. К земледелию тянутся и корни первой идеологии — религии. Хлеб становится предметом культа. Ведь не эстетическое наслаждение, не поэтический восторг при виде восходящего Солнца, а сознание своей зависимости от животворящих лучей дневного светила привело в свое время все народы земного шара к обоготворению Солнца. Хлеб — священный продукт. «Когда восходит хлеб, демоны чувствуют ужас, когда его жнут, они воют от отчаяния, а когда его мелют, они исчезают...» — говорится в одной из священных песен древних персов.

Обработка земли плугом, которая в настоящее время служит символом отсталости, в известную пору была событием революционного характера, преобразовавшим способ производства хлеба.

Второй после хлеба важнейший вопрос в жизни человека был связан с жилищем. Гончарное дело, переход от сырцового кирпича к обожженому сыграли исключительную роль в истории человека. Из кирпича возник город*. Тогда как плуг увеличивал только средства питания, город сгруппировал людей в общество, связал их трудом, вызвал у них сознание превосходства культуры, развил национальное самосознание, наконец, породил интеллектуальную дисциплину, направившую человечество на новый путь цивилизации.

Изобретение колеса — новый революционный момент в истории производства. Земледелие и обмен продуктами с соседними племенами (торговля) являлись мирными факторами прогресса.

Но история взаимоотношений человеческих коллективов пронизана и другими факторами: истребительными войнами, со-

---

* Приведенная оценка роли кирпича в развитии цивилизации дается известным французским географом, участником Парижской коммуны, Элизе Реклю в его книге «Человек и Земля» и относится к безлесным местностям Передней Азии. Первые города славян были деревянными, но это не противоречит идее Реклю.

провождавшимися захватами и порабощением целых племен, а впоследствии и целых стран. На огромных пространствах в долинах больших рек (Тигр и Евфрат, Нил, Инд, Янцзы), обеспечивавших орошением земли и служивших удобными путями сообщения, возникали могущественные рабовладельческие государства.

Труд огромного количества рабов позволил владыкам древних рабовладельческих государств построить величественные города, великолепные дворцы и храмы, о безумной роскоши которых мы можем составить себе лишь слабое представление по находимым при археологических раскопках останкам былой культуры.

Истоки нашей цивилизации следует искать в древней Вавилонии, погребенной в течение тысячелетий под песчаными дюнами Месопотамии. Ныне здесь находится государство Ирак. Интересно, что на поверхности земли здесь не сохранилось ни храмов, ни статуй, как на классической почве Греции и Италии, ни пирамид и обелисков, как в Египте. Только смутные фантастические сказания говорили о некогда существовавших в долинах Тигра и Евфрата могущественных царствах. Местные же легенды и сказки кочевников-бедуинов не шли дальше легендарного калифа Гарун-аль-Рашида, героя «Тысячи и одной ночи», правившего около 800 года нашей эры. Лишь находимые у местных жителей черепки с непонятными письменами да редкие предметы необычного домашнего обихода навели ученых-археологов в середине XIX века на мысль заняться раскопками небольших холмов, казавшихся нанесенными песчаными и земляными смерчами. И о счастье! Величайшие сокровища, поразительной роскоши дворцы, храмы, целые города были обнаружены под пластами песка и земли. Чем глубже слой, тем древнее культура, уходящая в даль веков на два-три и более тысячелетий до нашей эры*.

Здесь колыбель нашей цивилизации. Здесь некогда кипела жизнь. Здесь возникла и необходимая для развития любой науки письменность. Вавилонянам мы обязаны и введением календаря и счета времени. Вавилонские жрецы-астрономы подсчитали среднюю продолжительность года в 360 дней и ввели деление окружности на 360 градусов, а отсюда и шестидесятеричную систему счисления, впоследствии сменившуюся нашей десятеричной.

Вавилонские моряки имели настоятельную нужду в неподвижной точке для ориентировки на море (в «теле отсчета», как бы мы сейчас сказали). Они открыли небесный полюс (Полярную звезду), они же открыли планеты или блуждающие звезды, они сделались астрономами, так как были моряками.

---

* Рекомендуем нашим читателям увлекательно написанную книгу К. Керам «Боги, гробницы, ученые. Роман археологии». М., Изд-во иностр. лит., 1960.

Невольно возникает вопрос: какими техническими средствами располагали строители грандиозных сооружений Вавилона и Египта? При раскопках не обнаружено было ничего, подобного нашим кранам и транспортерам. Очевидно, и пирамидальные храмы, и дворцы Вавилона, и пережившие сорок веков пирамиды Египта были возведены руками рабов. Величайшая пирамида Хеопса достигает высоты 146 *м* и считалась одним из семи чудес света. Эта пирамида строилась несколько десятков лет и потребовала, по свидетельству греческого историка Геродота, 100 000 человек, сменявшихся каждые три месяца. «Вопль раздавался по всей стране, вопль страдания и безысходной муки».

По найденным при раскопках барельефам, изображающим сцены из жизни древнего Египта, можно видеть, что единственными механизмами, которыми пользовались строители, были наклонная плоскость, рычаг, катки да кнут надсмотрщика. Главной же силой при подъеме огромных каменных глыб было множество рабских рук, которые, сливаясь в одну равнодействующую, могли преодолевать чудовищные тяжести.

Для иллюстрации этого позвольте привести выдержку из книги «Здесь жила Нефертити» английской писательницы Мэри Чабб, участницы экспедиции, производившей раскопки в Египте. Вот как описывается момент подъема огромной каменной притолоки весом в несколько сот килограммов, которую надо было перенести с места раскопки в дом:

«В наше время ученые ломают голову, стремясь найти формулы, точно определяющие способы перемещения тяжестей. Простые египетские крестьяне, конечно, не знали их и тем не менее усвоили принципы, помогающие им выполнять тяжелую работу с наименьшей затратой энергии. Они действовали так, как будто знали о достижениях современных наук. Им помогал в этом многовековой опыт, приобретенный ценой многих усилий и ошибок. Постепенно, с незапамятных времен, создавались совершенные способы перемещения тяжестей.

По-моему, мы были свидетелями чего-то необычайного! Эти проворные смуглые люди, казалось, легко и просто заменяли машины. Какая-то тайная сила воодушевляла их, заставляла бурлить текущую в их жилах кровь далеких и славных предков. Те тоже ценой огромных усилий ворочали большие каменные глыбы, перевозя их из каменоломен сначала на волокушах, а потом на плотах по реке на равнины, где медленно вырастали первые гробницы — пирамиды и храмы фараонов.

Вот и сейчас способ доставки притолоки к дому был найден. Нам, привыкшим к колесному транспорту, нелегко было бы решить эту проблему, а они поступили очень просто: соединили короткие шесты так, что получили четыре длинных, а потом сделали из них огромный квадрат, крепко связанный в местах пересечения веревками. Он был значительно меньше притолоки. Рабочие придвинули это сооружение вплотную к ней, так,

что концы одной пары поручней касались ее, и очень легко и осторожно вкатили притолоку по этим поручням на своеобразные носилки. Вскоре огромный камень, слегка перехваченный для безопасности веревками, уже покоился на носилках. Около сорока человек, примерно по пяти у каждого конца поручней, подняли, словно перышко, все сооружение на плечи».

Вот вам и разгадка донаучной техники!

## 2. Греческая философия. Дифференциация наук. «Физика»

Высшей формы своего развития рабовладельческий строй достигает в древней Греции и Риме.

Рабовладельческий строй был в то далекое время одновременно и основой экономического и культурного прогресса античного мира.

«Только рабство сделало возможным в более крупном масштабе разделение труда между земледелием и промышленностью и таким путем создало условия для расцвета культуры древнего мира — для греческой культуры. Без рабства не было бы греческого государства, греческого искусства и науки, без рабства не было бы и римского государства. А без того фундамента, который был заложен Грецией и Римом, не было бы и современной Европы», — говорит в «Анти-Дюринге» Энгельс*. Переложив изнурительный физический труд на плечи рабов, класс древнегреческих и римских рабовладельцев мог отдаться созданию таких произведений искусства, философии, науки, которыми мы восторгаемся до сих пор.

Греческая наука неотделима от греческой философии, или, лучше сказать, натурфилософии (естествознания), бывшей тогда еще не расчлененной наукой.

Древняя Греция не была единым государством, она состояла из отдельных самостоятельных городов-государств, разбросанных по островам Эгейского моря, на побережье Малой Азии и на Балканском полуострове. Этим и объясняется разнообразие учений, взглядов и философских направлений.

Но море не только разъединяло, но и объединяло греков, потому что между отдельными городами поддерживалась оживленная связь, торговля и культурный обмен.

В связи с таким государственным устройством философия Греции не была сосредоточена в одном месте, а перемещалась одновременно с перемещением культурного центра страны (Милет, Эфес, Афины, Элея, Александрия).

В VI веке до н. э. город Милет, на побережье Малой Азии, был одним из крупнейших торгово-промышленных центров Греции. Через него шли торговые пути на Восток, в Персию, в Египет. В Милете, как высокоразвитом и процветающем горо-

* Ф. Энгельс. Анти-Дюринг. М., Политиздат, 1967, стр. 181.

де, зародилось материалистическое философское направление, возглавлявшееся Фалесом (624—547).

Купец, политический деятель и в то же время крупный ученый, Фалес не раз предпринимал путешествия в Вавилон и в Египет, где знакомился с астрономией и математикой. Известно, что Фалесу принадлежат и первые опыты по электричеству и магнетизму. Таким образом, уже на первых шагах философии можно видеть связь материалистической философии с успехами естествознания.

Фалесу принадлежит смелая и гениальная попытка свести бесконечное многообразие мира к единому и притом материальному началу. Таким началом всего существующего Фалес считал воду, вкладывая в это понятие значительно более глубокий смысл, чем содержится в словах «речная или морская вода». Герцен в своих «Письмах об изучении природы» замечает по этому поводу: «Сказать просто, что Фалес считал началом всему воду, а Пифагор — число, — значит выдать их за полусумасшедших или тупоумных»*. Нет, вода в том смысле, какой ей приписывал Фалес, была символом вечной изменчивости, текучести. Точно так же надо правильно подходить и к оценке Гераклита Эфесского (535—475), учившего, что начало всего — огонь. «Мир, единый из всего не создан никем из богов и никем из людей, а был, есть и будет вечно живым огнем, закономерно воспламеняющимся и закономерно угасающим». В. И. Ленин приводя эти слова Гераклита, оценивает их как «очень хорошее изложение начал диалектического материализма»**. «Παντα ρει» (читать: панта рей) — все течет и видоизменяется, колеблясь между бытием и небытием. Признавая одновременно бытие и небытие, движение и покой, Гераклит подходит диалектически к пониманию природы.

Мы не можем в нашей беседе подробно останавливаться на разборе различных философских учений, поэтому из философов-материалистов назовем еще только Демокрита (460—370) — основателя атомистического учения. Демокрит утверждал, что природа вечна и вечно движение несущихся в пустоте вечных атомов. Вещи отличаются друг от друга различным сочетанием атомов. Это учение впоследствии было развито Эпикуром (342—270) и до нас дошло в форме превосходной философской поэмы римского поэта Лукреция «О природе вещей». Что касается сочинений самого Демокрита, то ни одно из них до нас не дошло. Рассказывают, будто философы-идеалисты Платон, Аристотель скупали, где только могли, и сжигали книги Демокрита, чтобы у потомков не сохранилось памяти об этом вредном материалисте...

Философы-материалисты отражали идеологию прогрессивной демократии. Представители же аристократии стояли на

* А. И. Герцен. Письма об изучении природы. М., ОГИЗ, 1946.
** В. И. Ленин. Философские тетради. М., Политиздат, 1965, стр. 311.

идеалистических позициях. Крупнейшим представителем идеализма был Платон (429—347). Платон, считал, что философ не должен иметь дело с чувственным миром вещей, так как этот мир недоступен познанию, а представляет лишь тени и отражения истинного мира, мира идей. В своих политических взглядах Платон был крайним реакционером, ненавидившим демократию и активно боровшимся с нею. Характеризуя идеалистическую философию Платона, Джон Бернал* (современный физик, страстный борец за мир) замечает: «Маркс был уж очень добр к философам, когда сказал: «Философы лишь разным образом объясняли мир, но дело заключается в том, чтобы изменить его». Задача же, которой совершенно сознательно занялся Платон, заключалась в том, чтобы помешать миру изменяться, по крайней мере в направлении демократии».

На историю физики Платон не оказал никакого влияния, и если мы и упомянули о нем, то лишь для того, чтобы показать всю сложность и противоречивость хода исторического развития греческой философии, в которой отражалась борьба двух классов — класса демократов и класса аристократов. Отмечая это, В. И. Ленин говорил: «Новейшая философия так же партийна, как и две тысячи лет тому назад. Борющимися партиями... являются материализм и идеализм»**.

Как и в последующие этапы исторического развития, идеалистические учения всегда усиливались в годы политической реакции и упадка.

Платон и его ученик Аристотель жили в Афинах в то время, когда после поражения в войне со Спартой и внутренних потрясений (восстания рабов и бедноты) Афины потеряли самостоятельность и вынуждены были подчиниться, как и почти все греческие города, могущественному Македонскому государству. Этим и объясняется направление их философии. В то же время под владычеством Александра Македонского Греция достигла высочайшего внешнего расцвета. Аристотель (384—322), хотя обучался, а впоследствии и сам учил в основанной Платоном Академии, разошелся со своим учителем в трактовке основного вопроса философии — об отношении мышления к бытию, духа к природе. Он резко критиковал учение Платона об идеях, об иллюзорности чувственно воспринимаемого мира. Однако и в этом главном вопросе Аристотель колеблется между материализмом и идеализмом. Признавая реальность материи и объективность существования мира, Аристотель вводит второе основное начало — форму. Сама материя, по его учению, есть только возможность возникновения вещей, а не представляет собой чего-то определенного. Определенность ей придает только форма. Например, мрамор — это материя, но, для того чтобы

---

* Дж. Бернал. Наука в истории общества. М., Изд-во иностр. лит., 1956.

** В. И. Ленин. Материализм и эмпириокритицизм. М., Политиздат, 1967, стр. 341.

превратить мрамор в статую, скульптор должен придать ему определенную форму.

Учение Аристотеля, охватывая все области античного знания — логику, естествознание, историю, политику, этику, — является вершиной развития древнегреческой философии. У Аристотеля мы видим и начало дифференциации наук, выделение их из философии вообще. Аристотель подразделял теоретические науки на три части: «первую философию», математику и физику. Само слово «физика» было названием одного из сочинений Аристотеля, в котором он рассматривал понятия движения, места, времени*.

Учение Аристотеля сыграло исключительную роль в развитии науки, хотя и не всегда положительную. В средние века церковь использовала идеалистические корни философии Аристотеля, вытравив из его учения здоровые материалистические ростки.

Развитие древней науки начиная с III века нашей эры связано с основанным Александром Македонским в Египте городом Александрией. Центром естественно-математических и других наук стал Александрийский музей с его замечательной библиотекой. В хранилищах библиотеки было собрано около 500 тысяч свитков с произведениями крупнейших философов, драматургов, поэтов. Знаменитые ученые того времени группировались около музея: Евклид (геометр), Эратосфен (знаменитый географ и математик — друг Архимеда), Герон (известный своими опытами, хитроумными приборами и автоматами), Клавдий Птолемей (автор известной геоцентрической системы мира).

С Александрийским музеем связано начало научной деятельности Архимеда, приехавшего сюда из родных Сиракуз (Сицилия) для усовершенствования в математике.

Архимед (287—212) —гениальный математик и механик древнего мира — едва ли интересовался философией или гуманитарными науками. Все силы ума сосредоточил он на геометрических образах. Древние историки (Плутарх) рисуют его нам как ученого, безраздельно увлеченного математическими исследованиями: «Он жил как бы околдованный какой-то домашней сиреной, постоянной спутницей, заставлявшей его забывать пищу, питье и всякие заботы о своем теле».

В своих трудах по механике (о рычаге, центре тяжести, равновесии, законах гидростатики) Архимед применял те же методы, что и в математике**.

---

* Подробнее об Аристотеле и его «Физике» мы говорили в I части наших «Бесед».

** К сожалению, представления многих об Архимеде ограничиваются лишь приписываемыми ему анекдотическими афоризмами: «Дайте мне точку опоры...» «Эврика!..», «Не трогай моих кругов...» Если вы любите математику, то можно порекомендовать вам книгу проф. С. Я. Лурье «Архимед» (Изд-во АН СССР, 1945), в которой вы найдете прекрасное описание жизни Архимеда и методов его работы.

Архимеду принадлежит также и большое число технических изобретений, которые он с большим искусством применял при защите Сиракуз во время осады их римлянами.

Эпоха, в которую жил Архимед, получила название эллинистической, ею заканчивается история древней Греции (во II веке до нашей эры Греция превращается в римскую провинцию).

### 3. Крушение античной культуры. Темная ночь средневековья

Рабство, обеспечившее создание греко-римской культуры, явилось и причиной ее гибели. Рабский труд малопроизводителен. Раб не заинтересован ни в бережном обращении с орудиями труда, ни в результатах своей работы. Только применение огромного количества рабов и жесточайшая эксплуатация их компенсировали низкую производительность рабского труда.

От бесчеловечного обращения рабы гибли тысячами, и для восполнения убыли в рабочей силе надо было вести все новые и новые захватнические войны. Однако такая экспансия в древнем мире была ограничена и географическими условиями и трудностью организации далеких походов.

Доведенные до отчаяния рабы часто восставали, и хотя восстания подавлялись с беспримерной жестокостью, но все же они подрывали устои государства изнутри, а к границам римского государства извне все упорнее устремлялись орды германских и готских племен.

В 395 г. н. э. Римская империя распалась на две половины — Западную с Римом во главе и Восточную, столицей которой стала Византия (Константинополь). Ослабленное государство не могло противостоять напору внешних сил. Рим был разгромлен полчищами вестготов под предводительством Алариха в 410 г., а в 476 г. на развалинах Рима образовалось варварское остготское государство.

Старый античный мир лежал в развалинах. Города разрушены. Жизнь ушла в деревню, стала грубой, невежественной. Впоследствии здесь возникнут феодальные хозяйства, возникнут новые производственные отношения, новая общественная формация — феодализм.

Земли, захваченные покорителями Римской империи, военачальники племен-завоевателей раздавали своим приближенным, которые за это должны были выполнять ряд повинностей. Поместья, розданные на таких условиях, получили название феодов, а владельцы их — феодалов. Феодальное поместье состояло из усадьбы (замка) владельца и большего или меньшего числа мелких крестьянских хозяйств. В эту страшную эпоху в условиях беспрерывных войн и разбойничьих набегов крестьяне вынуждены были часто искать защиты у владельца замка и попадали в полную зависимость от феодала.

Феодал жил за счет труда своих крестьян. Руками крестьян изготовлялись и грубые предметы домашнего обихода (утварь

и одежда), руками крестьян обрабатывались и земли владельца. Ремесло и сельское хозяйство еще не были разделены. Почти полное отсутствие торговли при таком натуральном хозяйстве влекло за собой и отсутствие всякого интереса к устройству дорог и улучшению средств транспорта.

Среди населения от низших и до самых высших слоев царило грубое невежество. Единственно грамотным слоем населения было духовенство, но оно было враждебно науке. Христианская религия, выросшая в недрах рабовладельческого Рима в период его упадка, теперь стала господствующей. Церковь, бывшая богатейшим землевладельцем, оказывала могущественное влияние на политическую, общественную и частную жизнь, глушила всякое проявление свободной мысли. Лишь через тысячу лет начнется возрождение наук и искусств*.

## 4. Появление арабов на мировой арене

В то время как в Западной Европе разорялись города, замирала торговля, а культура стояла на самом низком уровне, на Востоке появились новые исторические силы в лице арабов, которые сыграли выдающуюся роль в возрождении и передаче культурного наследия античного мира новому времени.

Покорив огромную территорию, охватывающую Месопотамию, Египет, Северную Африку, Испанию, Персию, часть Индии и Туркестана, арабы образовали великое мусульманское государство — халифат (VII—XI вв.). Созданы были новые городские центры цивилизации — Багдад (в Месопотамии), Кордова (в Испании). Расцвет халифата сопровождался значительным развитием науки и искусства. Ознакомившись с греческой культурой, арабы перевели многое на арабский язык, в том числе труды Аристотеля. Впитав в себя культуру покоренных народов, они создали изумительный сплав восточной и античной культур. Арабские халифы для придания блеска и славы своему двору приглашали к себе ученых, писателей и философов других стран. Наверное, вам известны имена Фирдоуси (персидский поэт), Авиценны (таджикский философ и врач), Омара Хайяма (поэт и математик), Гафиза (персидский поэт). Все они жили в эпоху великого халифата.

В области физики следует отметить работы арабских ученых по оптике и механике, усовершенствованию измерительных инструментов (весов). Особенно велики достижения арабов в математике и химии («алгебра», «алхимия» — слова арабского происхождения).

---

* Следует отметить, что приведенная картина крушения античной культуры относится к первому периоду раннего феодализма в Западной Европе. В других странах развитие этой фазы общественной формации протекало в иных условиях и иными темпами. Например, в Китае феодализм существовал более двух тысячелетий, в России — с IX в. до крестьянской реформы 1861 г.

Чрезвычайная растянутость территории, охватывающей области с различными экономическими условиями, привела к тому, что уже в IX веке начался распад единого халифата на отдельные, местные, халифаты. Элизе Реклю (см. сноску на стр. 231), характеризуя это блестящее, но кратковременное вмешательство арабов в историю народов, сравнивает его с внезапным расцветом цветка алоэ, этого удивительного растения пустыни, которое стоит серым и запыленным пятьдесят или сто лет и вдруг раскидывает большой, яркий, пунцовый цветок, веселящий своим блеском унылую равнину.

## 5. Рассвет. Зарождение экспериментальной физики

Как ни медленно происходило развитие науки и техники при феодализме, но все же движение вперед не прекратилось, ведь оно всегда вызывается и поддерживается потребностями людей. Феодализм победил рабовладельческий строй, потому что обеспечивал бо́льшую производительность труда. Крестьянин, хотя и находившийся в полной зависимости от помещика-феодала, был более заинтересован в результатах труда на своей земле, чем бесправный раб.

Постепенно восстанавливаются города, и в них развивается ремесло и торговля. Возникает товарное производство. Все это будет способствовать замене феодализма новой, более прогрессивной общественной формацией — капитализмом. Разумеется, смена одной общественной формации другой — это сложный и длительный процесс, протекающий в разных странах в разных темпах и в разное время.

Ярким примером неравномерного развития стран является эпоха Возрождения в Италии (XIV—XVI вв.). Здесь, прежде чем где бы то ни было в Европе, начинается процесс перерождения феодальных производственных отношений. Здесь впервые в мировой истории произошла бурная, хотя и кратковременная, вспышка капитализма еще в рамках феодализма.

Что представлял собой остальной мир Европы в это время? На заре образования Русского государства, только что освобождавшегося от монгольского ига, когда в Москве княжил Василий Темный, а в Европе еще не был рассеян мрак средневековой ночи, когда только начинали вспыхивать восстания крестьян и городской бедноты, доведенных до отчаяния жестокой эксплуатацией и непрерывными войнами, когда в Испании пылали костры инквизиции, — здесь, в Италии, возник очаг небывалого расцвета культуры. Целый фейерверк блестящих имен: поэты Данте, Петрарка, Боккаччо, скульпторы и живописцы Леонардо да Винчи, Рафаэль, Микеланджело, Тициан!

С точки зрения истории физики нас особенно должен интересовать Леонардо да Винчи (1452—1519), современник Колумба и Коперника. Баловень судьбы, красавец, светский щеголь и

в то же время глубокий мыслитель и экспериментатор, художник и ученый — таков Леонардо.

Состоя при дворе герцога Сфорцо в Милане и Лоренцо Великолепного (Медичи) во Флоренции придворным инженером, архитектором, скульптором и живописцем, Леонардо одновременно работал в области разнообразных наук — механики, астрономии, химии, геологии, анатомии, физиологии и ботаники. Гениальный художник и талантливый инженер, Леонардо являет собой редчайший в истории пример всестороннего ученого.

В области механики он занимался исследованием механизмов, трения в машинах, изучал движение воды в трубах и каналах, полет птиц в воздухе и принципы летательных машин.

В то время как в университетах Европы под строжайшим контролем католической церкви господствовала схоластика*, трактовавшая науку как служанку богословия и сводившая ее к изучению древних текстов церковных авторитетов (исключение допускалось только для искаженных, подогнанных под каноны церкви сочинений Аристотеля), Леонардо звал к экспериментальному исследованию природы и математической обработке результатов исследования. «Мудрость есть дочь опыта», «Механика есть рай наук математических», — говорил он. Видя в сочетании эксперимента и теории сущность научного метода, он писал: «Теория — полководец, практика — солдат».

По странному капризу Леонардо вел свои записи справа налево, так что читать их можно было только при помощи зеркала. Быть может, так своеобразно зашифровывал Леонардо свои труды, которые никогда не выпускал в свет, потому ли, что был недоволен их неполнотой, или потому, что чувствовал их несвоевременность: такие идеи и много позже приводили людей на пытку и на костер.

Максимальный экономический расцвет Италии приходится на XIV—XV века. Вся средиземноморская торговля, обеспечивавшая сношения с Востоком, находилась в руках итальянских купцов. По всей Европе славились итальянские сукна, шелка, кружева, оружие и стекло. Огромные богатства, стекавшиеся в торговые итальянские города, и развитие промышленности преобразили итальянские города. Воздвигаются роскошные дворцы богачей, наполненные картинами и статуями.

Однако великолепный очаг Возрождения в Италии вскоре должен был угаснуть. Отсутствие централизованного государства, упадок итальянской торговли, после того как португальцами был открыт морской путь на Восток, франко-испанские войны, в результате которых Италия почти целиком потеряла самостоятельность, — все это привело к реставрации феодализма и

---

* *Схоластика* (от лат. schola — школа) — средневековая христианская философия, господствовавшая в школьном преподавании и всецело зависевшая от богословия.

надолго вычеркнуло Италию из разряда передовых государств Европы.

Периоды, объединяемые тем же термином «Возрождение», имели место и в других странах (Голландии, Франции, Германии и др.), но в других темпах и других формах.

## 6. Физика XVII века

17 февраля 1600 года на площади Цветов в Риме был сожжен на костре Джордано Бруно за проповедование учения Коперника о вращении Земли.

Вышедшая в 1543 г. книга Коперника «Об обращении небесных кругов» явилась поистине революционным событием в развитии науки, так как новое учение наносило решительный удар основным догмам церкви. Земля из центра мироздания превращалась в заурядное небесное тело, обращающееся вместе с другими планетами вокруг Солнца. Такое развенчание роли Земли подрывало основы христианского учения. Понятно, с какой яростью обрушилась церковь на учение Коперника. Книга его была, в числе других «еретических» сочинений, внесена в список запрещенных книг. Запрет был снят лишь в 1835 г., когда учение Коперника уже стало прочным достоянием науки. Сколько же мужества надо было иметь ученым XVII века, чтобы выступать в защиту «опасного» учения в страшные годы господства инквизиции!

Немецкий астроном Кеплер (1571—1630) уточнил систему Коперника, установив на основании множества наблюдений законы движения планет по эллиптическим орбитам.

Галилей, направив телескоп на небо (1610 г.), открыл спутников планеты Юпитер, обращающихся вокруг Юпитера наподобие планет солнечной системы, а также фазы планеты Венера. Все это были реальные факты, убийственные для старой геоцентрической системы. Млечный Путь — таинственное раньше небесное явление — распался в поле зрения телескопа на бесчисленное множество звезд, и вместо хрустальных сфер, населенных небожителями, перед восхищенным взором астронома раскрылся безграничный космос.

Инквизиция давно подозрительно следила за работами Галилео Галилея, за его астрономическими открытиями, за его опытами. Книга Галилея «Диалоги о двух системах мира», вышедшая в 1632 г., послужила поводом к знаменитому процессу против Галилея и запрещению Галилею защищать устно и письменно «ложные мысли» о вращении Земли. Остаток жизни больной, почти ослепший Галилей проводит в изгнании в своем поместье, в Арчетри под Флоренцией.

Здесь пишет он книгу «Беседы о двух новых науках», в которой излагает свои взгляды на свободное падение тел, на полет

брошенных тел (горизонтально и под углом), на явление удара, на проблемы прочности машин и сооружений (балок, колонн). Кроме того, в книге затрагивается ряд других фундаментальных вопросов механики: закон инерции, колебания маятника, равновесие на наклонной плоскости. Таким образом, можно сказать, что Галилеем заложены основы кинематики и динамики, которые в следующем поколении приобретут уже совершенную форму в трудах Ньютона.

Давая общую оценку всему периоду физики XVII века, мы можем охарактеризовать его как период рождения физики как науки.

Первые академии. Первоочередной задачей, стоявшей перед учеными XVII в., была борьба со старым мировоззрением, которое упорно защищала католическая церковь. Всякие проявления свободной мысли подвергались жесточайшим репрессиям. Чтобы противостоять им, чтобы иметь возможность обмениваться мыслями и открытиями, ученые того времени начинают объединяться в тайные или находящиеся под покровительством влиятельных особ научные общества. В своей борьбе против мелких феодалов королевская власть в ту пору еще искала опоры в крепнущей буржуазии и потому охотно принимала под свое покровительство как отдельных ученых, так и их объединения. Естественно, что первые научные общества возникали там, где укреплялись новые формы общественной жизни. Так, в Италии еще в 1560 г. возникло первое ученое общество, поставившее своей целью изучение законов природы. Общество это, принявшее название «Академия познания тайн природы», просуществовало недолго и вскоре было запрещено церковью.

В 1603 г. в Риме при поддержке герцога Фредерика Чези образуется новое общество — Академия Линчео (академия рысьеглазых). Острые глаза 32 членов академии, среди которых был и Галилей, были устремлены на исследование законов природы путем опыта и наблюдения. Результаты исследований должны были распространяться среди населения. Для этого были открыты музей, библиотека, лаборатория и обсерватория. После смерти ее основателя Академия распалась.

Через 20 лет (1657 г.) во Флоренции двумя братьями Медичи была основана *Academia del Cimento* (Академия опыта). Академия была оснащена лучшими имевшимися тогда в Европе инструментами, в ее лаборатории члены академии проводили наблюдения над атмосферным давлением, изучали тепловые свойства твердых и жидких тел, измеряли скорость звука.

Возникновение академий, положивших начало коллективному научному творчеству в области проблем, разрешение которых оказывалось непосильным одному индивидуальному уму, мы проследим и на дальнейших этапах развития физики в разных странах Европы.

Создание инструмента для научного исследования. Для экспериментального метода исследования необходим соответствующий инструмент. Создание основных инструментов характерно для физики XVII века.

Телескоп Галилея позволил ему сделать открытия, революционизировавшие мировоззрение: горы на Луне превращали ее из небесного светила, созданного только для освещения земных ночей, в планету, аналогичную по физической природе Земле; фазы Венеры, спутники Юпитера своим существованием подтверждали теорию Коперника; видимые в телескоп звезды, недоступные невооруженному глазу, рождали мысль о бесконечности Вселенной.

Открытие микроскопа голландским оптиком Янсеном (1590 г.) вводило наблюдателя в область невидимого микромира.

Научное исследование тепловых процессов стало возможным только после изобретения термометра (Галилеем).

Изучение законов колебания маятника (Галилеем) привело к изобретению часов с маятником (Гюйгенсом и Гуком в 1657—1675 гг.).

Опыт Торричелли (1643 г.) позволил флорентийским академикам построить прибор для измерения атмосферного давления, который бургомистр города Магдебурга Герике превратил в водяной барометр и манометр.

Нельзя обойти молчанием и изобретение воздушного насоса (Герике, 1657 г., Бойль, 1660 г.), позволившего подойти к понятию вакуума, отрицавшегося античной наукой.

Не вдаваясь в подробности и в оценку технических достоинств и недостатков этих приборов, а также не касаясь вопроса о приоритете того или другого изобретателя, подчеркнем основное — без любого из названных приборов совершенно немыслим был бы дальнейший прогресс физической науки.

Создание новых приборов не только ставило на научную почву исследование явлений природы, но и рождало новые плодотворные идеи в оптике, гидро- и аэростатике и теплоте. Так, в качестве примера можно привести открытие и изучение законов преломления света (Снелиусом и Декартом), дальнейшее усовершенствование телескопа Кеплером и Ньютоном. Применение зрительных труб в мореплавании и военном деле, часов для определения местонахождения корабля в море, законов гидростатики для постройки шлюзов и каналов (Галилей, Паскаль, Стевин), первые исследования в области земного магнетизма (Джильберт) — все это условия и одновременно следствия технического прогресса, обеспечившего победу нового общественного строя, новых экономических и производственных отношений (капитализма).

Слово «инструмент», кроме своего буквального значения, применяется и для характеристики средств математической обработки результатов исследования. Именно в XVII веке наука получила такой мощный математический инструмент, как ана-

литическая геометрия (Декарт, 1637 г.), логарифмы (Неппер, 1613 г.) и, наконец, дифференциальное и интегральное исчисление (Ньютон и Лейбниц, около 1670—1680 гг.).

Во избежание, однако, неправильного понимания прогрессивной роли капитализма в период его становления считаем нужным привести слова Джона Бернала, относящиеся к данному вопросу: «Условия подъема капитализма сделали возможным и необходимым подъем экспериментальных наук. С точки зрения исторических перспектив этот факт имеет гораздо большее значение, чем политические или экономические события того времени, ибо капитализм представляет собой лишь преходящий этап в экономическом развитии общества, в то время как наука является постоянным приобретением человечества. И если вначале капитализм сделал науку возможной, то наука, в свою очередь, делает капитализм ненужным»*.

Первые научные журналы. Исключительную роль для прогресса физических знаний играет обмен научной информацией между учеными различных стран. Индивидуальная переписка отдельных ученых, например письма Галилея к Кеплеру, Декарта к Мерсенну, Ньютона к Гуку и Лейбницу, оставалась в сфере их личных взаимоотношений и лишь позднее становилась достоянием истории. Изолированность ученых различных стран, конечно, сильно тормозила развитие физики. Необходима была более широкая форма научного общения.

Появление первого периодического научного издания связано с образованием Лондонского Королевского общества (1660 г.).

В соответствии с принятым нами планом рассмотрим сначала, каково было политическое положение Англии в эту эпоху.

После преждевременной вспышки капиталистических отношений в Италии, о чем было упомянуто выше, в Европе, за исключением Голландии, в течение XVII столетия преобладал феодальный строй. Английская буржуазная революция 1640 г. открывает эпоху капитализма и считается началом новой истории. Англия на долгие годы становится первоклассной морской державой.

Под влиянием изменившихся социально-экономических условий изменилась и идеологическая жизнь Англии. Решительный удар старому мировоззрению нанес Френсис Бэкон (1566—1626). Маркс и Энгельс называют Бэкона истинным родоначальником английского материализма и вообще опытных наук.

Бэкон стоял за объективное исследование природы, полагая во главе его опыт. В одном из своих сочинений — «Новая Атлантида» Бэкон рисует утопическую картину научного общества «Дом Соломона», которое прекрасно организовало изучение природы, в результате чего народ страны пользуется блага-

---

* Дж. Бернал. Наука в истории общества. М., Изд-во иностр. лит., 1956.

ми высокой техники. Эта утопия отражала чаяния молодого зарождающегося класса буржуазии, интересы которого были направлены на использование науки для хозяйственного развития. Создание Лондонского Королевского общества вполне отвечало этим требованиям победившего класса. В числе членов Общества были знаменитые ученые: Бойль, Барроу, Валлис, Гук. В 1703 г. председателем Общества избирается Исаак Ньютон. Королевское общество ставило своей целью распространение собственных открытий и знакомство с научными исследованиями в других государствах. С 1664 г. Общество стало издавать научный периодический журнал «Философские известия». Впоследствии на страницах журнала стали появляться статьи иностранных авторов.

Второй печатный научный орган — «Журнал ученых» — стал выходить во Франции за год до основания Академии наук в Париже (1666 г.).

## 7. Физика XVIII века

Какие важнейшие события произошли на международной арене в XVIII веке? Промышленный переворот в Англии — переход от мануфактурного (основанного на ручном труде) производства к машинному, — образование Североамериканских Соединенных Штатов, французская буржуазная революция, образование Российской империи. Основной смысл событий этого века—дальнейшее победоносное наступление капитализма.

Конечно, и здесь нельзя говорить о календарных границах — они расплывчаты, но общее направление исторического процесса, выражающееся в переходе от низших форм к более высоким, выступает вполне явственно. Рассмотрение хода исторического процесса по столетиям — это только уступка наиболее привычному способу счета времени. В действительности же события смежных эпох перекрываются, и история не разделяет их, как листки отрывного календаря. К какому столетию, например, отнести такую крупную фигуру, как Ньютон? Годы жизни его — 1643—1727, выход в свет его гениального труда «Математические начала натуральной философии» — 1687 г., и все же мы склонны отнести Ньютона к XVIII веку, так же как Галилея (1564—1642) к XVII.

XVIII век! Позади осталась эпоха мрачного религиозного фанатизма и церковного гнета. Новый век даже получил название — «век Просвещения».

Крупнейшими представителями просветительной философии были Вольтер, Дидро, Даламбер, Гольбах. Вокруг издававшейся Дидро и Даламбером Энциклопедии, задачей которой было создание генеалогического дерева (родословной) всех наук и искусств, группировался весь цвет французской мысли и литературы, лучшие специалисты во всех областях знаний и лучшие популяризаторы науки.

Резкая антирелигиозная направленность Энциклопедии вызвала протест со стороны реакционных кругов. Подстрекаемая клерикалами (церковниками), королевская прокуратура добилась временного запрещения издания. Энциклопедия продолжала издаваться нелегально, и в 1774 г. все одиннадцать томов были вручены подписчикам.

Обратимся снова к физике. XVIII век в истории физики — это период создания классической механики, начатый еще в предыдущем столетии Галилеем и теперь завершенный Ньютоном и его продолжателями.

Лаплас, Лагранж, Даламбер, братья Бернулли, Эйлер продолжали возведение совершеннейшего здания механики Ньютона. Сложились и сформулированы основные понятия массы, силы, импульса. Развились отдельные отрасли прикладной механики.

Однако усиленное развитие механики в то время, когда другие науки были, по выражению Энгельса, еще в пеленках, привело к утверждению механистического мировоззрения, к распространению законов механики на всю природу. Попытки объяснить сущность таких явлений немеханического характера, как тепловые, световые и электрические, привели физиков к ложному учению о невесомых жидкостях, или флюидах, — теплороде, световой материи, электрических и магнитных жидкостях.

Будучи скорее рабочей гипотезой, учение о невесомых жидкостях на первых порах способствовало накоплению знаний о теплоте, свете и электричестве.

Блэк (1728—1799), Лавуазье (1743—1794) и Рихман (1711—1753) создали аппаратуру и разработали методы калориметрии (уравнение теплового баланса, понятие о скрытой теплоте агрегатных превращений).

Учение о светоносных корпускулах (Ньютон) нисколько не препятствовало развитию геометрической оптики и ее практических приложений.

Сведения об электричестве ученых XVIII века ограничивались явлениями из области электростатики. Грей в Англии и Дюфе во Франции, наблюдая явления электризации (1722 г.), установили деление тел на проводники и непроводники и существование двух видов электричества — стеклянного и смоляного, которым Франклин (Америка, 1745 г.) дал современное обозначение «+» и «—». Тот же Франклин и одновременно Ломоносов и Рихман исследовали атмосферное электричество.

Исключительную позицию по отношению к учению о невесомых жидкостях занимал М. В. Ломоносов, восстававший против такого объяснения, противоречащего материалистическому мировоззрению. Причину теплоты и электричества он искал в движении. Этим он почти на столетие опередил современную ему науку.

Годы жизни М. В. Ломоносова — 1711—1765. Историк в изумлении останавливается перед фигурой этого северного колосса, гиганта мысли, ума исключительно разностороннего. Трудно указать область из наук того времени, в которую Ломоносов не внес бы существенный вклад, оказавший влияние на дальнейшее развитие науки. Физик, химик, минералог, астроном, историк, филолог, поэт и в то же время великий патриот, ратовавший за развитие русской науки и русского просвещения, боровшийся с засильем иностранцев в основанной Петром I Академии.

Из заслуг Ломоносова в области физики в первую очередь должны быть отмечены его идеи относительно кинетической природы тепла, теории «об упругой силе воздуха», понятие об абсолютном нуле температур, опытное утверждение закона сохранения вещества и движения, учение «о твердости и жидкости тел», объяснение электрической природы грозы и полярных сияний. Экспериментальные работы Ломоносова отличаются как глубиной задуманного плана, так и точностью выполнения. Ломоносовым сконструировано много новых приборов, имеющих большое значение для практических исследований. Среди них упомянем универсальный барометр, позволяющий определить ускорение силы тяжести, проект «ночезрительной трубы» и ряд приборов по оптике.

Ломоносову обязаны мы разработкой и введением научно-физической терминологии в русском языке. Им введены в обиход ранее отсутствовавшие у нас термины: атмосфера, барометр, манометр, микроскоп, метеорология, термометр и др.

## 8. Физика XIX века

Последние годы XVIII столетия ознаменовались драматическими событиями французской буржуазной революции. Влияние революции 1789—1794 гг. можно проследить на протяжении всего XIX века. В. И. Ленин так выразил эту мысль: «Весь XIX век, тот век, который дал цивилизацию и культуру всему человечеству, прошел под знаком французской революции. Он во всех концах мира только то и делал, что проводил, осуществлял по частям, доделывал то, что создали великие французские революционеры буржуазии»*.

Деятели французской революции, среди которых мы встречаем и имена крупнейших ученых, показали себя прямыми продолжателями и преемниками великих представителей просветительной философии.

Введение метрической системы мер. Одним из первых мероприятий революционного правительства было введение новой системы мер. Упраздненная по политиче-

* В. И. Ленин. Соч., т. 29, стр. 342.

ским соображениям Парижская Академия наук была заменена временным комитетом мер и весов. Франция нуждалась тогда в коренной реорганизации своих мер, пришедших в полное расстройство. Пестрота и запутанность мер чрезвычайно тормозили развитие хозяйства и торговли.

Работы по выработке новой системы мер и весов продолжались с 1791 по 1799 г. Наконец, 22 июня 1799 г. эталоны метра и килограмма от имени Национального института были торжественно представлены Законодательному собранию и переданы на вечное хранение в государственных архивах Франции. «Для всех времен, для всех народов», — гласил девиз, предложенный в проекте медали в честь установления метрической системы.

Постановка образования и научные учреждения Франции. В целях проведения широкой реформы образования по проекту, предложенному Лавуазье, намечалось создание четырех ученых обществ: общества физических и математических наук, общества по приложению науки и техники, общества моральных и политических наук, общества литературы и искусства. В 1795 г. этот проект был реализован путем создания Конвентом «Института Франции». Учреждены были Нормальная школа и Политехническая школа, в которых преподавали замечательные ученые того времени Лагранж, Лаплас и Монж.

Из учеников Политехнической школы вышла целая плеяда выдающихся ученых: Ампер, Араго, Гей-Люссак, Малюс, Пуассон и другие. Нельзя не остановить внимание читателя на двух знаменитых трудах Лапласа — «Изложение системы мира», в котором он развивает гипотезу о происхождении солнечной системы из газообразной туманности, и «Анализ теории вероятностей», послуживший основой нового всеобъемлющего метода научного исследования — статистического метода.

Блестящий расцвет наук во Франции оказал огромное влияние и на прогресс научного исследования в других странах Европы.

Возникновение термодинамики и электродинамики. Быть может, ни в один из предшествующих периодов истории физики не выступала так явственно взаимная связь физики и техники, как в XIX веке. Иногда называют его веком пара и электричества. В этом довольно вульгарном определении кроется все же достаточная доля истины.

Рождение двух наук — термодинамики и электродинамики— произошло именно в этом веке. С теоретической и идеологической стороны эти два направления научного исследования связаны с установлением закона сохранения энергии.

О работах Роберта Майера, Джоуля и Гельмгольца, главных создателей этого закона, мы уже говорили в I части наших «Бесед» (очерк «Трагедия Юлиуса Роберта Майера»). Созданию второго закона термодинамики посвящена была беседа «Сади Карно и его формула». Это позволяет не останавливаться больше на

изложении истории и содержания этих открытий. Но нельзя не указать на логическую и историческую необходимость открытия закона превращения и сохранения энергии именно в это время.

В сохранении движения были убеждены еще греческие философы-материалисты, но понятие об энергии как мере движения в его общем смысле, отражающем способность энергии переходить из одной формы в другую, могло сформироваться только после того, как были изучены эти формы и их взаимные превращения.

Формирование понятия энергии и закона ее превращений побуждалось и потребностями техники. В XIX веке вместо прежних механических и водяных двигателей стали применяться тепловые, а потом и электрические двигатели.

Параллельно с термодинамикой развивалась и молекулярно-кинетическая теория (Дальтон, 1801 г.; Авогадро, 1811 г.) и ее статистическое толкование (Максвелл, 1860 г.; Больцман, 1896 г.).

В области электричества XIX век был веком изучения законов электрического тока. Знакомство с электричеством до этого времени ограничивалось только явлениями электростатики, о практическом применении которых не могло быть и речи. Растущее производство требовало новых источников энергии, и они были найдены в виде энергии электрического тока.

Важнейшими моментами в истории изучения электричества были: открытие источников тока (Гальвани, Вольта); изучение законов тока (Ампер, 1820 г.; Ом, 1824 г.); открытие магнитного действия тока (Эрстед, 1820 г.); открытие электромагнитной индукции (Фарадей, 1831 г.); разработка теории электромагнитного поля (Максвелл, 1871 г.); открытие электромагнитных волн (Герц, 1888 г.; Попов, 1895 г.).

Давая общую характеристику рассматриваемого этапа, можно сказать, что XIX век ознаменовался более глубоким проникновением в материю. Если изучение атомно-молекулярных и электрических явлений раскрывало все больше и больше природу вещества, то разработанное Максвеллом учение об электромагнитных волнах, подтвержденное работами Герца, Попова, Лебедева, ввело в физику понятие поля.

## 9. Наши дни, наши задачи

В нашем обзоре этапов истории физики мы подошли к порогу XX века — дальше начинается современность. Подведем итоги: чему учит нас история нашей науки?

Новая физика XX века подготовлена открытиями XIX и предыдущих веков. Из противоречий классической механики и электродинамики родилась теория относительности. Из конфликта классической физики с теорией излучения возникла теория квантов.

В наших беседах мы неоднократно отмечали необычайный, порой парадоксальный характер идей новейшей физики. Но не казались ли парадоксальными новые идеи и раньше? Лютер называл безумной теорию Коперника; творец закона сохранения энергии Роберт Майер его близкими был признан сумасшедшим и несколько лет вынужден был провести в доме умалишенных; основатель статистической физики и молекулярной теории Больцман был доведен до самоубийства непониманием современниками его идей. Когда в науке открываются новые факты и для их объяснения выдвигаются новые теории, расходящиеся с так называемым «здравым смыслом», т. е. с привычными представлениями, они кажутся парадоксальными, безумными. Но проходят годы, и эти идеи, подтвержденные новыми фактами и практикой жизни, становятся обычными и общепризнанными. Этому учит нас история науки.

Развитие науки происходит не равномерно, а быстро ускоряющимися темпами. Просматривая хронику предшествовавших столетий, мы можем подметить, что каждое новое столетие характеризуется бо́льшим числом открытий, числом ученых, превышающим все предыдущие столетия.

Применяя математический язык, мы могли бы сказать, что рост науки происходит по закону возрастающей геометрической прогрессии, по закону экспоненциальной функции. Это связано с самой сущностью науки. Ученые работают не изолированно, а должны передавать свои знания своим ученикам, а те в следующем поколении составят в каком-то проценте большее число новых ученых, и т. д. Статистика подтверждает, что по некоторым показателям научного прогресса, например по числу научных учреждений, числу научных работ, можно обнаружить даже некоторый постоянный коэффициент роста. Так, число университетов в Европе (начиная с XII в.) увеличивалось вдвое через каждые сто лет, а с XV века — вдвое через каждые 66 лет. И чем дальше, тем выше взлетает экспонента прогресса. Этому тоже учит нас история.

Конечно, в закон роста вмешиваются различные социальные факторы — изменение структуры общества, новые экономические условия, войны... Вспомните тысячелетний разрыв, который отделяет крушение античной культуры от «возрождения» наук.

Подумайте, какую страшную опасность таит в себе угроза атомной катастрофы (термоядерной войны), которая на века, на тысячелетия может погасить огонь современной цивилизации. Поэтому наше правительство и все прогрессивные представители человечества выдвигают как основной лозунг нашего времени — борьбу за мир.

XIX век был веком развитого капитализма. В XX веке капитализм вступил в последнюю фазу своего развития—империализм. За три столетия своего существования капитализм создал условия для пышного расцвета науки и техники,

но он же создал и новый класс — пролетариат, на знамени которого начертан призыв к бесклассовому обществу, к коммунизму.

Использование неисчерпаемых запасов атомной и ядерной энергии, покорение космоса — эти проблемы, к которым уже подошла современная физика, раскрывают перед человечеством перспективы, потрясающие воображение. Но задачи, стоящие перед будущей физикой, не под силу старому миру; решать эти проблемы будет новое общество. Этому учит нас марксистское, материалистическое понимание истории.

Вам предстоит жить в XXI веке. Свидетелями и участниками каких открытий и достижений будете вы! Но это должно налагать на вас и большую ответственность. Вот выдержка из «Письма к молодежи» выдающегося нашего ученого-химика, академика Н. Д. Зелинского (1861—1953): «Молодой человек моей Родины! Ты родился, вырос и живешь в счастливое время — время великих дерзаний и свершений... Будь же достоин своего великого времени. Мне хочется передать тебе — человеку, которому принадлежит будущее, — основное, что, мне кажется, определяет победы в жизни, в науке.

Первое — это настойчиво овладевай всей широтой имеющихся в распоряжении человечества знаний, не замыкаясь в одной узкой специальности, — вот первое, что я хочу тебе посоветовать.

Никогда не считай, что ты знаешь все, что тебе уже больше нечему учиться. Я учился всю жизнь, продолжаю учиться сейчас, буду учиться, пока будет хватать на это моих сил...

Учиться упорно, учиться всегда — вот второе, что я хочу тебе посоветовать.

Умей работать в коллективе. В сегодняшней науке только коллектив может работать по-настоящему плодотворно... без уменья работать в большом коллективе не может быть ученого.

Общественный строй нашей жизни открывает широчайшие возможности для развития всех твоих способностей. Используй эти возможности. В учебе, в труде, в науке, в беззаветном служении своему народу ты найдешь свое счастье»*.

---

* Цитировано по статье к 100-летию со дня рождения Н. Д. Зелинского. «Правда» от 7 февраля 1961 г.

# ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Сейчас много говорят об увлеченности и о воспитании увлеченности. В заключение наших «Бесед» приведу следующие мысли об истоках увлечения. Пишет современный историк, профессор Ленинградского университета: «Я всегда ищу в молодом человеке, пришедшем к нам экзаменоваться, нечто более ценное, чем знания по программе, — влюбленность в наше дело. У истоков увлечения стоит школьный учитель. Я вижу первую задачу учителя — разбудить живые склонности в каждом ученике, развить его интеллект до умения найти призвание и следовать ему. Это необходимо для полноты жизни, для счастья всякому человеку — и тому, кто не будет учиться в вузе. Это необходимо для всякой науки, и не только исторической.

Сейчас на экзамене чаще всего обнаруживаешь, что у молодого человека больше знаний, чем культуры, память его работает интенсивнее, чем мысль. Думаю, что во многом это объясняется почти полной несвязанностью школьных наук друг с другом. Мир, история цивилизации, культура оказываются в сознании ученика нелепо расчлененными.

Нам нужны люди, учившиеся в нормальной школе, где гармонично сочетается изучение всех предметов, входящих в комплекс знаний, именуемый средним образованием. Повторяю: я считаю определяющим в развитии склонностей школьника не столько тип школы, сколько энтузиазм, увлеченность педагога»*.

На протяжении всех наших бесед я пытался способствовать воспитанию увлеченности, а на многочисленных экскурсах в различные области знания, искусства и литературы способствовать воспитанию общей культуры моих юных читателей. Удалось ли мне это, пусть ответят сами читатели.

---

* Цитировано по статье проф. С. Окуня «Истоки увлечения». «Известия» от 3 февраля 1966 г.

## ТРЕХЗНАЧНАЯ ТАБЛИЦА ЛОГАРИФМОВ*

### Употребление таблицы логарифмов

#### Нахождение логарифма

1) Найти lg 138.

На пересечении строки «1, 3» и графы «8» находим мантиссу 140. Характеристику (2) определяем по соображению. Имеем: lg 138 = 2,140.

2) Найти lg 5,27.

На пересечении строки «5» и графы «2» находим мантиссу 716 для числа 52. Поправку для третьей цифры отыскиваем в той же строке в графе поправок под цифрой 7. Здесь же находим 6. Следовательно, мантисса для 527 равна 716 + 6 = = 722 и lg 5,27 = 0,722.

3) Найти lg 0,608.

На пересечении строки «6» и графы «0» находим мантиссу 778. Поправку для третьей цифры отыскиваем в той же строке, в графе поправок под цифрой 8. Здесь находим 6. Следовательно, мантисса для 608 равна 778 + 6 = 784 и lg 0,608 = = $\bar{1}$,784.

#### Нахождение числа

4) Найти число, логарифм которого 1,193.

Отыскав мантиссу 193, мы видим, что она отвечает числу 156. Следовательно, 1,193 = lg 15,6.

5) Найти число, логарифм которого $\bar{1}$,927.

В таблице нет мантиссы 927. Ближайшая меньшая мантисса 924 отвечает числу 84. Поправку числа для недостающих 3 единиц мантиссы отыскиваем в графе поправок над цифрой 3 той же строки, где взята была мантисса: над тройкой стоит вверху графы цифра 6. Следовательно, мантисса 927 отвечает числу 846, а искомое число равно 0,846.

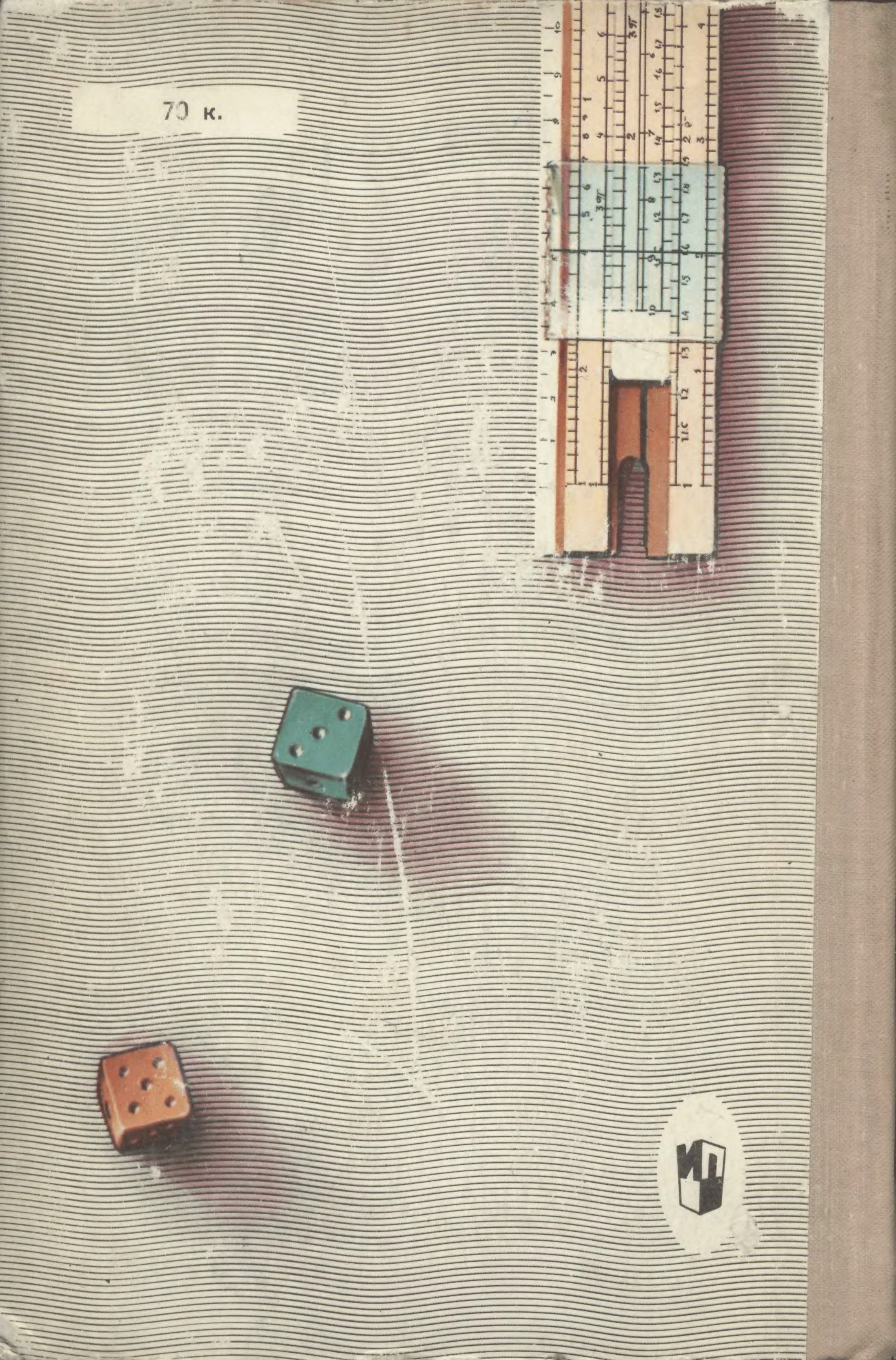
---

* Из книги Я. И. Перельмана «Занимательная алгебра».

# ТРЕХЗНАЧНЫЕ ЛОГАРИФМЫ

$\lg \pi = 0{,}497$
$\lg 2\pi = 0{,}798$
$\lg \sqrt{2} = 0{,}150$
$\lg \sqrt{3} = 0{,}239$

| | 0 | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 | 9 | Поправки 1 2 3 | 4 5 6 | 7 8 9 |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| 0,1 | 000 | 004 | 009 | 013 | 017 | 021 | 025 | 029 | 033 | 037 | | | |
| 1,1 | 041 | 045 | 049 | 053 | 057 | 061 | 065 | 068 | 072 | 075 | | | |
| 1,2 | 079 | 083 | 086 | 090 | 093 | 097 | 100 | 104 | 107 | 111 | | | |
| 1,3 | 114 | 117 | 121 | 124 | 127 | 130 | 134 | 137 | 140 | 143 | | | |
| 1,4 | 146 | 149 | 152 | 155 | 158 | 161 | 164 | 167 | 170 | 173 | | | |
| 1,5 | 176 | 179 | 182 | 186 | 188 | 190 | 193 | 196 | 199 | 201 | | | |
| 1,6 | 204 | 207 | 210 | 212 | 215 | 218 | 220 | 223 | 225 | 228 | | | |
| 1,7 | 230 | 233 | 236 | 238 | 241 | 243 | 246 | 248 | 250 | 253 | | | |
| 1,8 | 255 | 258 | 260 | 263 | 265 | 267 | 270 | 272 | 274 | 277 | | | |
| 1,9 | 279 | 281 | 283 | 286 | 288 | 290 | 292 | 295 | 297 | 299 | | | |
| 2 | 301 | 322 | 342 | | | | | | | | 2 4 6 | 8 10 12 | 14 16 18 |
| 2 | | | | 362 | 380 | 398 | 415 | 431 | 447 | 462 | 2 4 5 | 7 9 11 | 13 14 16 |
| 2 | | | | | | | | | | | 2 3 5 | 6 8 10 | 11 13 14 |
| 3 | 477 | 491 | 505 | | | | | | | | 1 3 4 | 6 7 8 | 10 11 13 |
| 3 | | | | 519 | 532 | 544 | 556 | 568 | 580 | 591 | 1 2 4 | 5 6 7 | 8 10 11 |
| 4 | 602 | 613 | 623 | | | | | | | | 1 2 3 | 4 6 7 | 8 9 10 |
| 4 | | | | 634 | 644 | 653 | | | | | 1 2 3 | 4 5 6 | 7 8 9 |
| 4 | | | | | | | 663 | 672 | 681 | 690 | 1 2 3 | 4 4 5 | 6 7 8 |
| 5 | 699 | 708 | 716 | 724 | 732 | 740 | 748 | 756 | 763 | 771 | 1 2 2 | 3 4 5 | 6 6 7 |
| 6 | 778 | 785 | 792 | 799 | 806 | 813 | 820 | 826 | 833 | 839 | 1 1 2 | 3 4 4 | 5 6 6 |
| 7 | 845 | 851 | 857 | 863 | 869 | 875 | 881 | 887 | 892 | 898 | 1 1 2 | 2 3 4 | 4 5 5 |
| 8 | 903 | 909 | 914 | 919 | 924 | 929 | 935 | 940 | 945 | 949 | 0 1 2 | 2 2 3 | 4 4 4 |
| 9 | 954 | 959 | 964 | 969 | 973 | 978 | 982 | 987 | 991 | 996 | 0 1 2 | 2 2 3 | 4 4 4 |
| | | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 | 9 | 1 2 3 | 4 5 6 | 7 8 9 |


70 к.